

Corso di Laurea Magistrale in Informatica

Corso di Robotica



## **Sensori per la robotica**

Cecilia Laschi  
cecilia.laschi@sssup.it

# Una prima suddivisione:



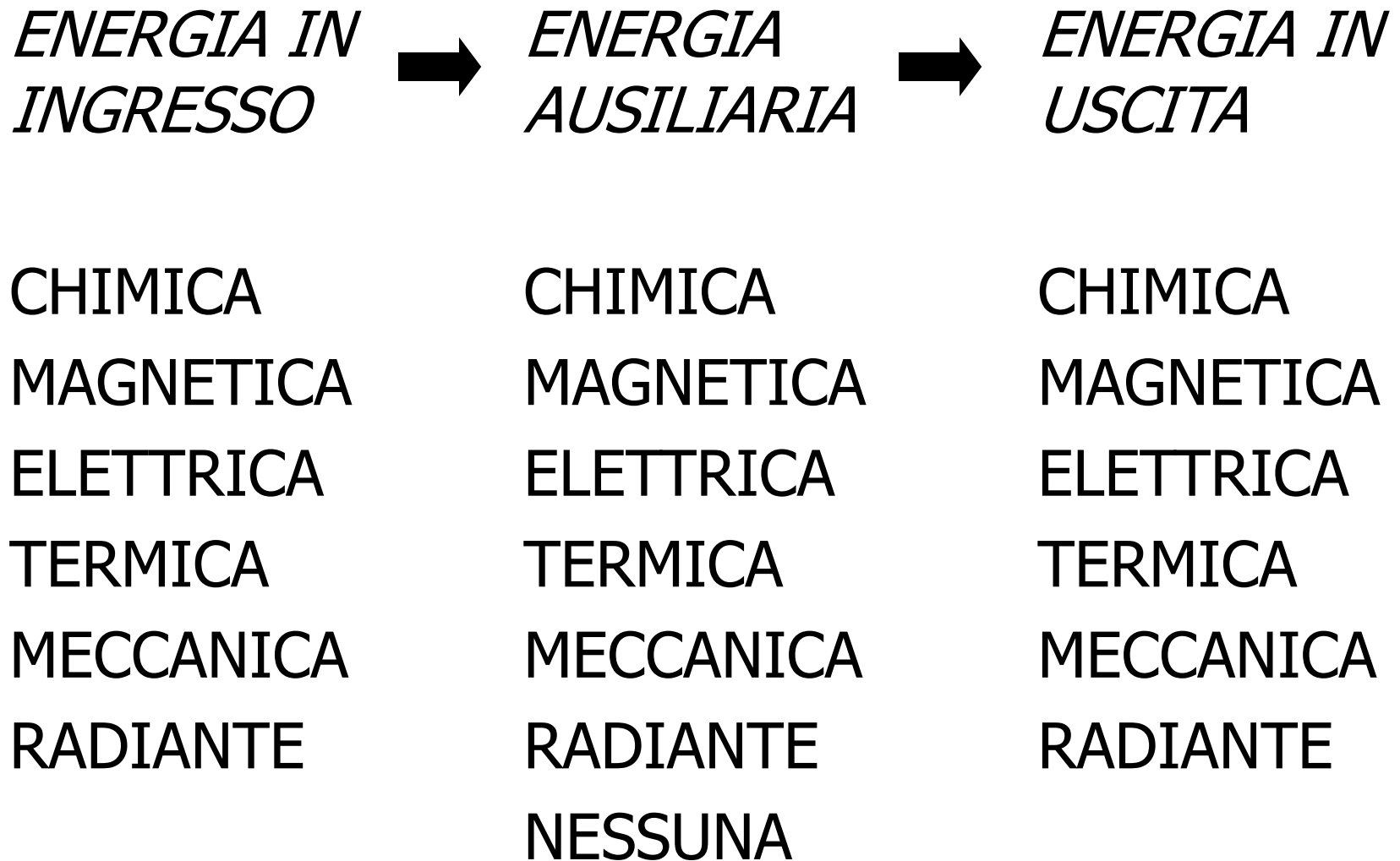
- sensori passivi:
  - convertono direttamente l'energia dell'ingresso in energia di uscita, senza l'ausilio di sorgenti esterne
- sensori attivi:
  - richiedono energia dall'esterno (eccitazione) per la conversione

# Classificazione dei trasduttori

*Sul tipo di energia in ingresso, in ingresso o ausiliaria*

- Radiante - onde elettromagnetiche:
  - intensità, frequenza, polarizzazione e fase
- Meccanica - parametri esterni della materia:
  - posizione, velocità, dimensione, durezza, forza
- Termica:
  - temperatura, gradiente di temperatura, calore
- Elettrica:
  - potenziale, corrente, resistenza, capacità
- Magnetica:
  - intensità di campo, densità del flusso, permeabilità
- Chimica - struttura interna della materia:
  - concentrazioni, struttura del cristallo, stato di aggregazione

# Trasformazioni di energia in un trasduttore





# Trasformazioni di energia in un trasduttore - *Es: ENCODER OTTICO*

*ENERGIA IN  
INGRESSO*



*ENERGIA  
AUSILIARIA*



*ENERGIA IN  
USCITA*

CHIMICA  
MAGNETICA  
ELETTRICA  
TERMICA  
MECCANICA  
RADIANTE

CHIMICA  
MAGNETICA  
ELETTRICA  
TERMICA  
MECCANICA  
RADIANTE  
NESSUNA

CHIMICA  
MAGNETICA  
ELETTRICA  
TERMICA  
MECCANICA  
RADIANTE

# Proprietà fondamentali di un sensore



- FUNZIONE DI TRASFERIMENTO
- CALIBRAZIONE (TARATURA)
- LINEARITÀ
- ISTERESI
- ACCURATEZZA
- RIPETIBILITÀ
- RISOLUZIONE
- SENSIBILITÀ
- SENSIBILITÀ AL RUMORE
- VITA UTILE
- STABILITÀ

# Funzione di trasferimento



La *funzione di trasferimento* è la relazione tra la grandezza da acquisire e l'uscita del sensore stesso

# Calibrazione



- L'operazione di calibrazione di un sensore corrisponde alla misurazione della grandezza in uscita per valori noti della grandezza in ingresso al sensore stesso.
- Per ciclo di calibrazione si intende una prova che copra tutto il campo di misura del sensore; la prova viene suddivisa in due parti, una per valori crescenti della grandezza e l'altra per valori decrescenti

# Linearità



Se la funzione caratteristica input/output di un sensore viene rappresentata graficamente su una scala lineare, la *LINEARITÀ* è un'indicazione della deviazione dell'output misurato del sensore rispetto ad una linea retta.

La linea retta può essere scelta in vari modi. Ad es:

- 1) linea retta tra i punti dati dagli output del sensore relativi agli input 0 e 100%
- 2) linea retta che meglio approssima la curva dell'output del sensore con il metodo dei minimi quadrati

La linearità corrisponde al massimo scostamento, espresso in % di fondo scala, tra curva di calibrazione e una linea retta di riferimento

# Isteresi

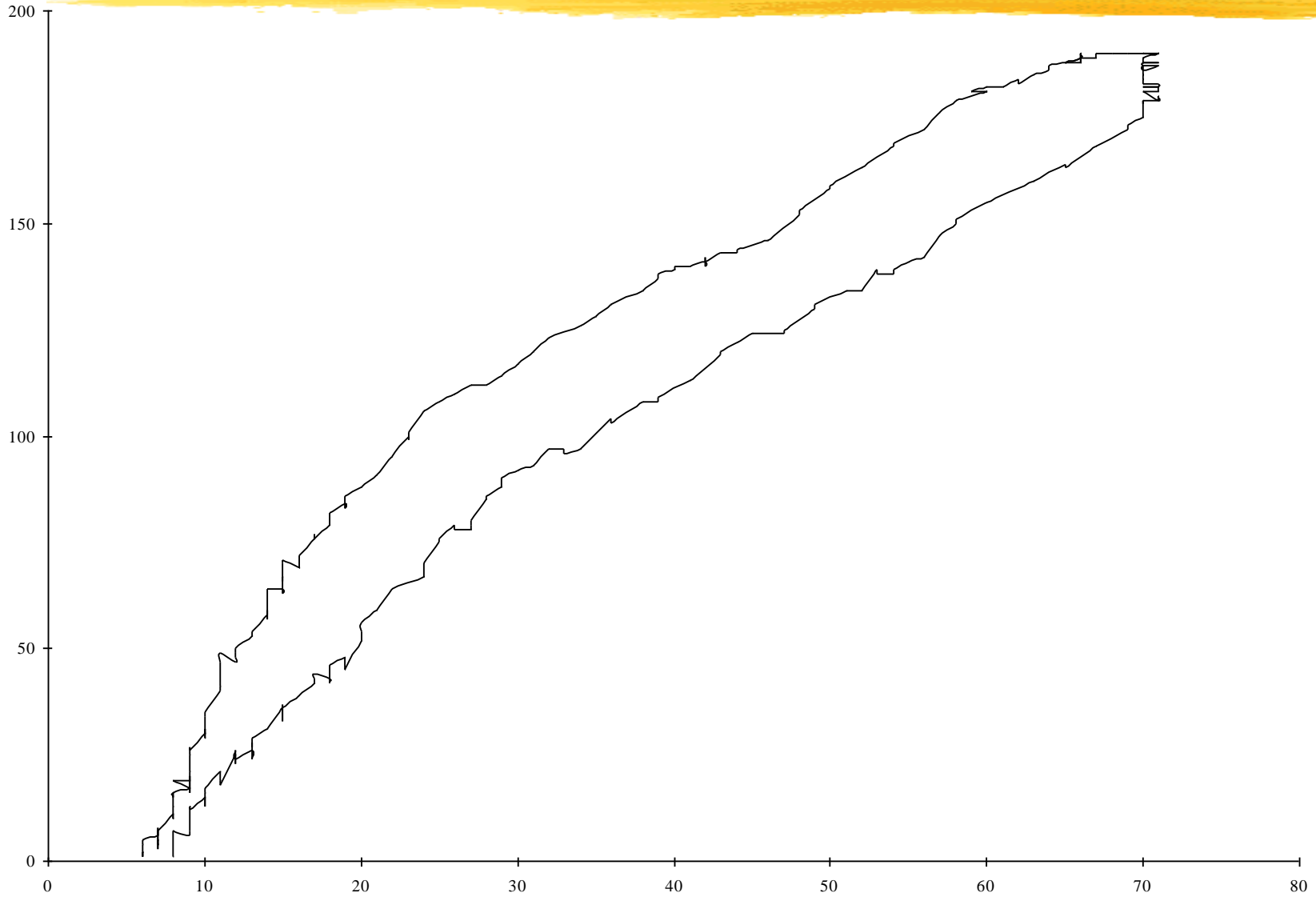


Se un sensore è affetto da *ISTERESI*, per uno stesso valore di input l'output può variare in funzione del fatto che l'input stia crescendo o decrescendo al momento della misurazione

L'ISTERESI corrisponde alla massima differenza tra i due cammini di andata e di ritorno dell'uscita di un sensore durante il ciclo di calibrazione.

Si esprime in percentuale del fondo scala (% f.s.).

# Caratteristica di un sensore di contatto (array tattile)



# Accuratezza



L'*accuratezza* rappresenta l'errore massimo tra la grandezza reale e quella misurata

L'accuratezza esprime l'assenza di errori sistematici nella misura: una misura è tanto più accurata quanto più la media delle misure si avvicina al valore vero della grandezza.

L'accuratezza è spesso espressa come rapporto fra l'errore sistematico e il valore della grandezza.

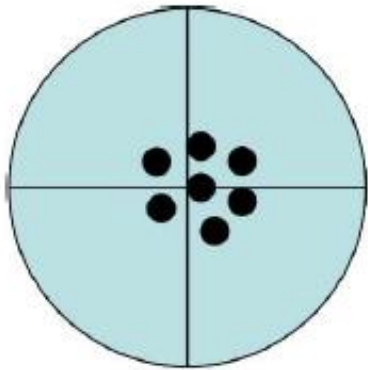


# Ripetibilità

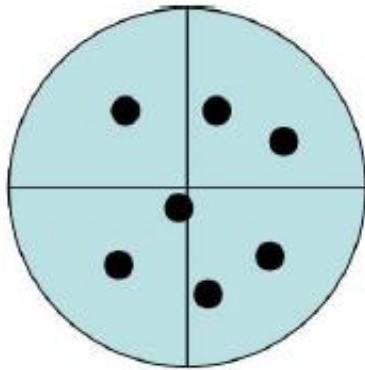


Quando uno stesso valore di input è applicato ad un sensore, la *RIPETIBILITÀ* è una misura della variabilità nell'output del sensore

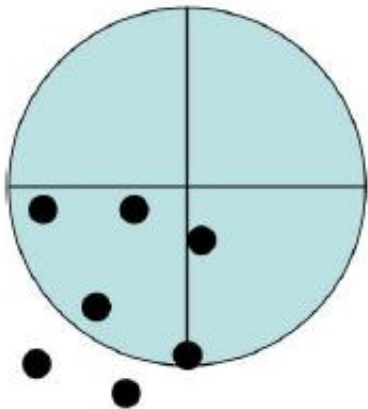
# Accuratezza e Ripetibilità



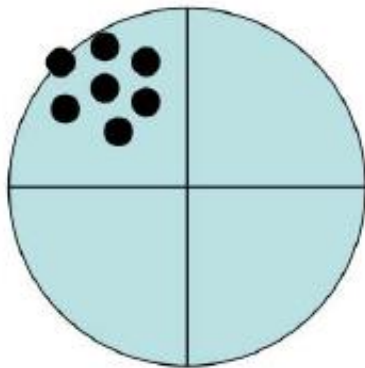
a)



b)



c)



d)

Nel caso a) la media delle misure approssima bene il valore vero e la dispersione non è grande: perciò si dice che è accurato e ripetibile. Anche il caso d) è ripetibile, perché le misure non sono disperse, ma non accurato, perché le misure hanno un valor medio lontano dal valore vero: il caso b), al contrario, è accurato, ma non ripetibile; il caso c) infine non è né accurato né ripetibile.

# Risoluzione



La *RISOLUZIONE* è la minima variazione nell'input che determina una variazione nell'output del sensore

# Sensibilità



Una piccola variazione dell'input provoca una piccola variazione corrispondente nell'output.

La *SENSIBILITÀ* è il rapporto tra la variazione dell'output e la variazione dell'input

# Rumore



Il *RUMORE* è il livello di segnale presente nell'output del sensore non provocato dall'input del sensore

# Vita utile



E' il tempo per il quale il sensore opera senza modificare le sue prestazioni

# Stabilità



Capacità del sensore a conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un certo intervallo di tempo (lungo, medio, breve).

# Altri parametri statici

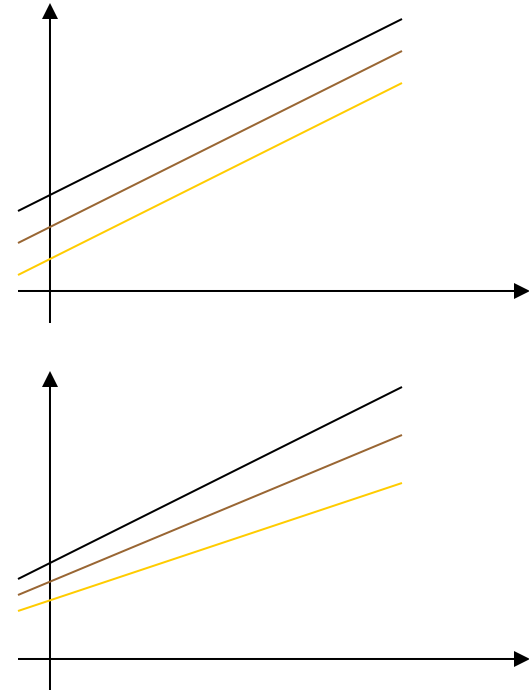


- Tempo di risposta
- Range di ingresso
- Costo, dimensioni e peso
- Risposta in frequenza
- Fattori ambientali
- Temperatura max/min
- Tempo di warm-up
- Presenza di gas, fumi, ..
- ...



# alcuni parametri dinamici

- drift dello zero
  - ad esempio a causa della temperatura
- drift della sensibilità



# Funzione dei sensori in un robot



- Percezione dello **stato interno**  
(propriocezione)
- Percezione dello **stato esterno**  
(esterocezione)

# Funzione dei sensori in un robot



- Percezione dello **stato interno**: misura di variabili interne al sistema che sono usate per il controllo del robot. Ad esempio, la posizione dei giunti.

# Funzione dei sensori in un robot



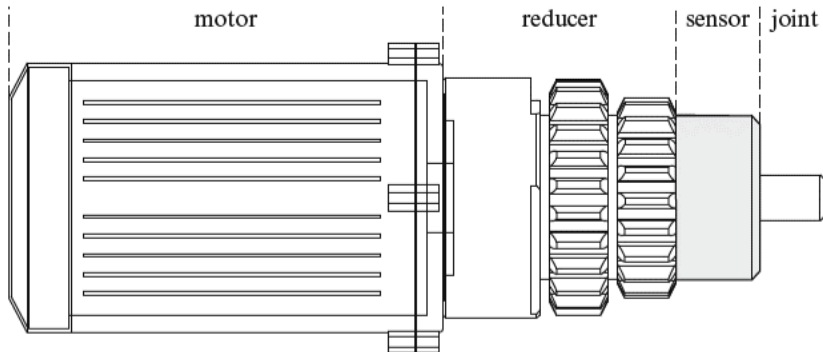
- Percezione dello **stato esterno**: misura di variabili caratterizzanti l'ambiente di lavoro, quali ad esempio la distanza, la prossimità, la forza.

# Sensori di posizione

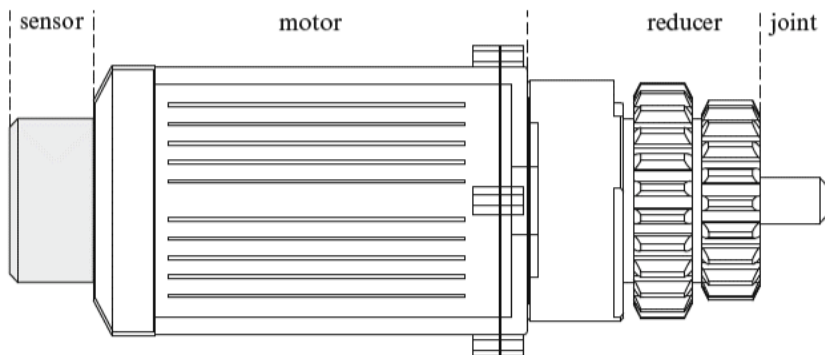


- Switch
- Encoder ottici
- Potenzimetri
- Sensori a effetto Hall

# Posizionamento dei sensori di posizione



A valle del riduttore



A monte del riduttore

$\theta$ : posizione angolare del giunto

$\theta_m$ : posizione angolare del motore

$k$ : rapporto di riduzione del motore

$$\theta = \frac{\theta_m}{k}$$
$$\frac{d\theta}{d\theta_m} = \frac{1}{k} \Rightarrow d\theta = \frac{1}{k} d\theta_m \quad \Rightarrow \text{l'errore di misura del sensore è ridotto di un fattore } k$$

# Switch

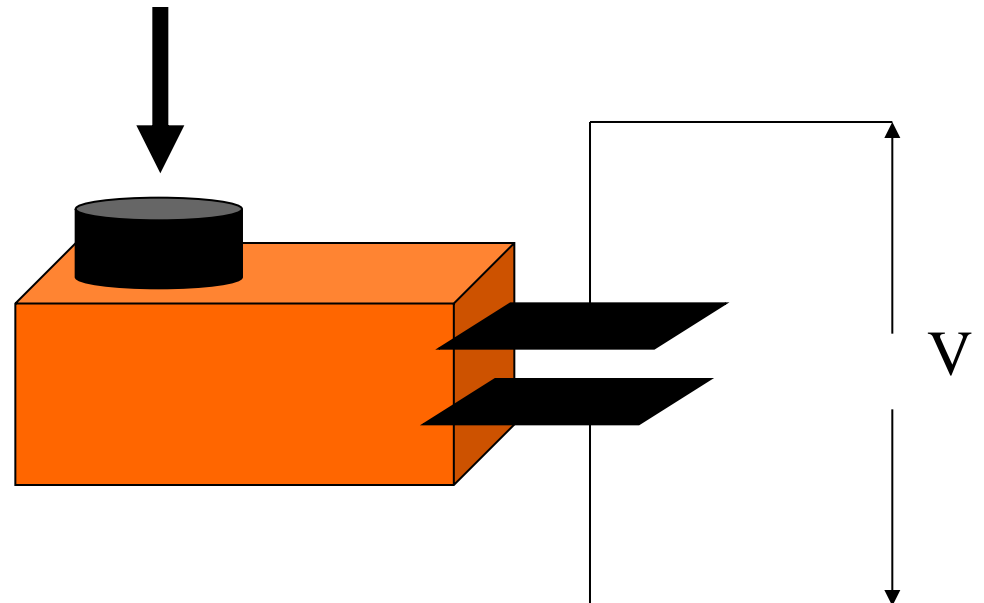
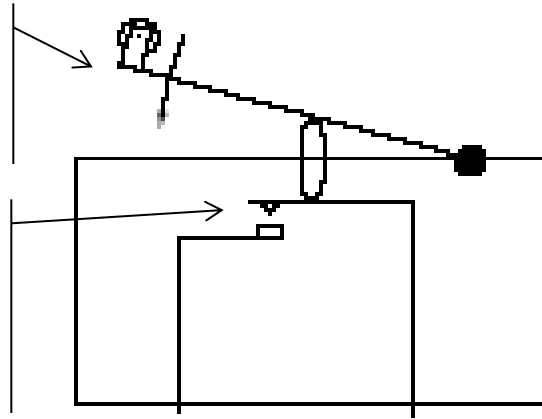


- Sensori di spostamento più semplici
- Forniscono un solo dato:  
contatto / non contatto
- Applicazioni come sensori di posizione:
  - sensori di impatto su robot mobili
  - whisker
  - sensori di fine corsa per i giunti di un manipolatore

# Switch meccanici

LEVETTA CHE VIENE  
PREMUTA SE AVVIENE UN  
CONTATTO

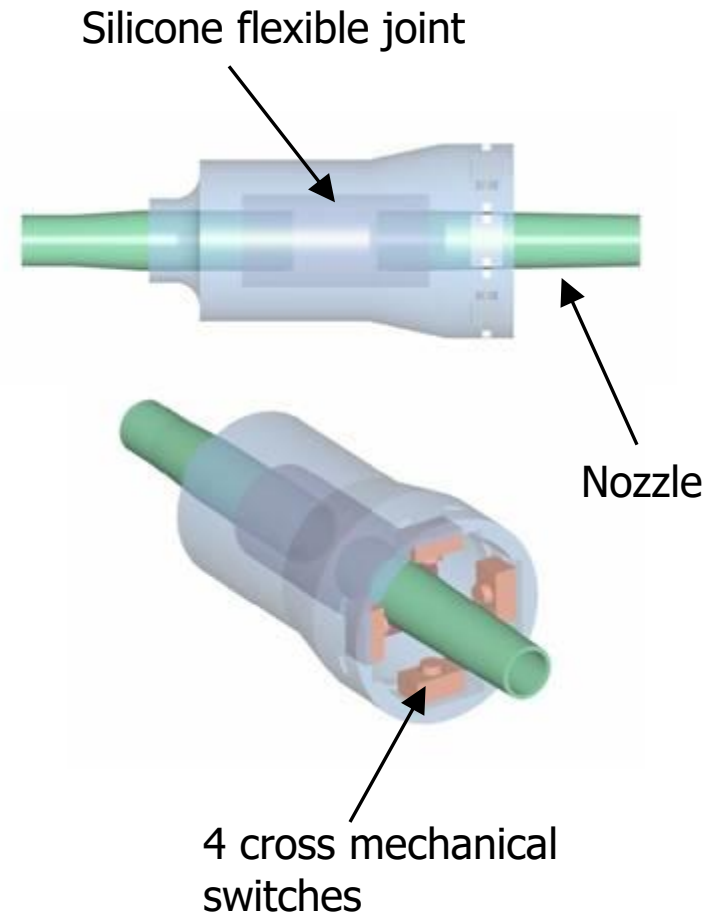
CONTATTO  
MECCANICO CHE  
CHIUDE UN CIRCUITO  
ELETTRICO



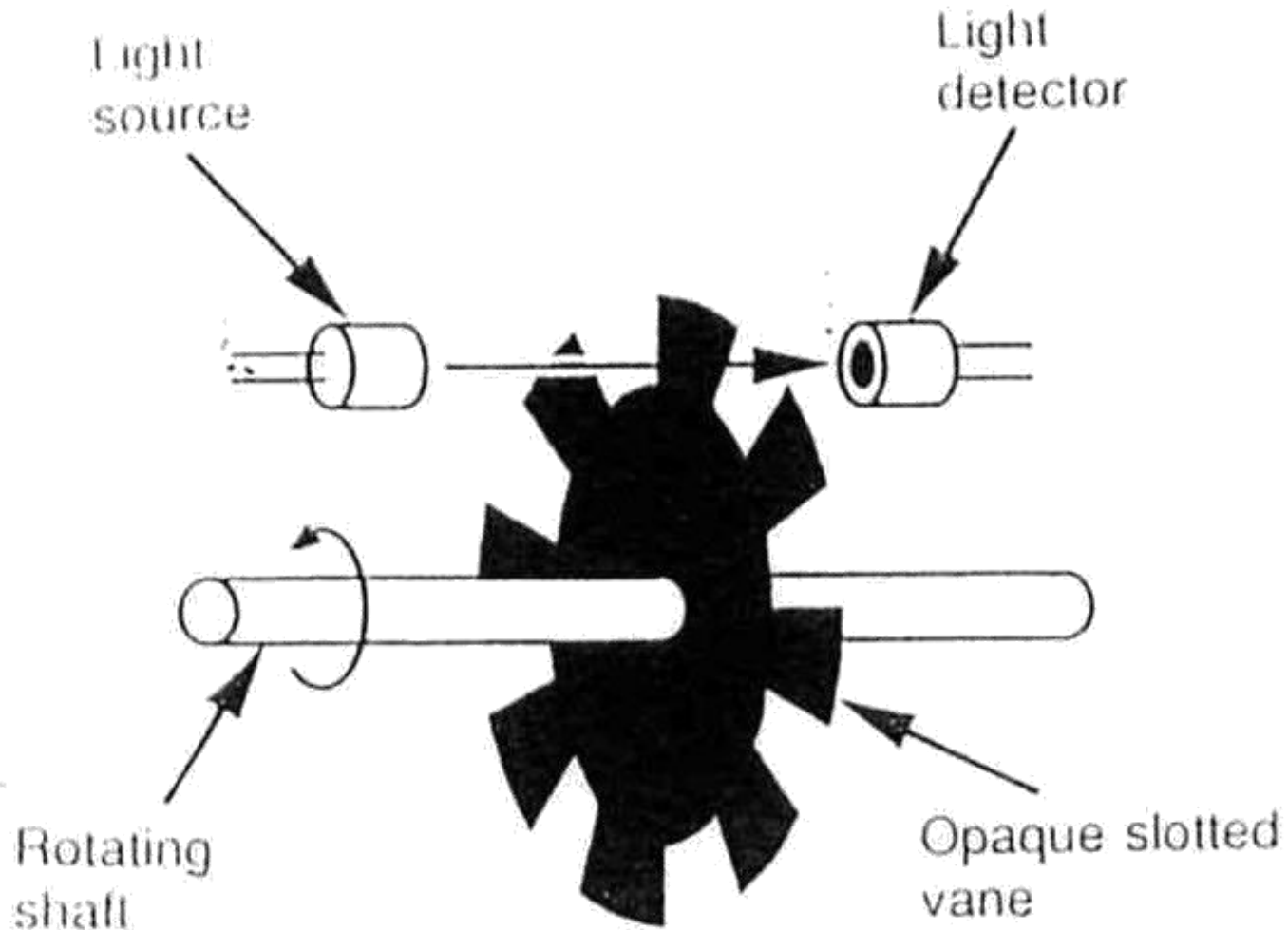


# Oral-Joystick: human-machine interface of a feeding assistive device for the severely disabled

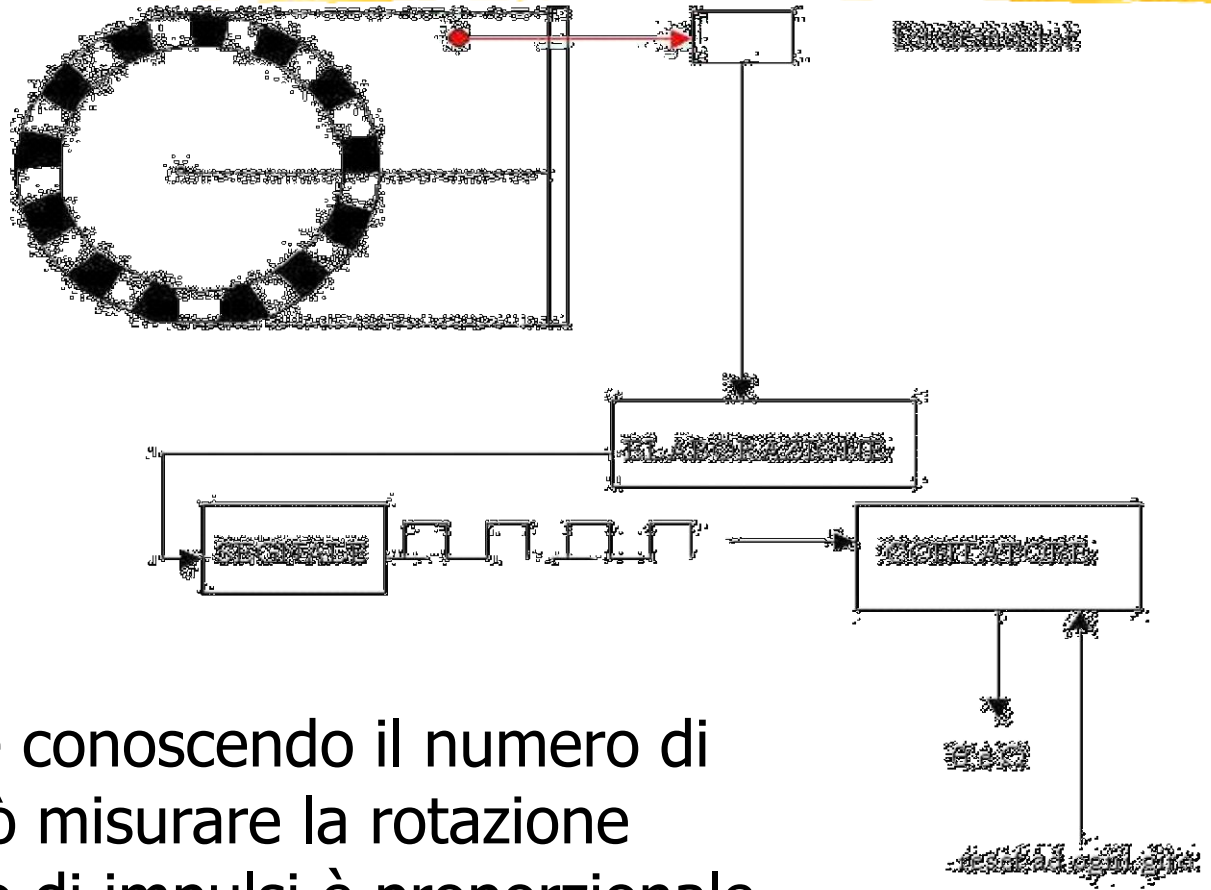
The Oral-Joystick is a straw-like tube for drinking with a nozzle, connected by a *silicone flexible joint*, in contact with four cross mechanical switches. The user can push the switches and activate specific functions of the feeding device, only with simple movements of the mouth.



# Encoder ottici



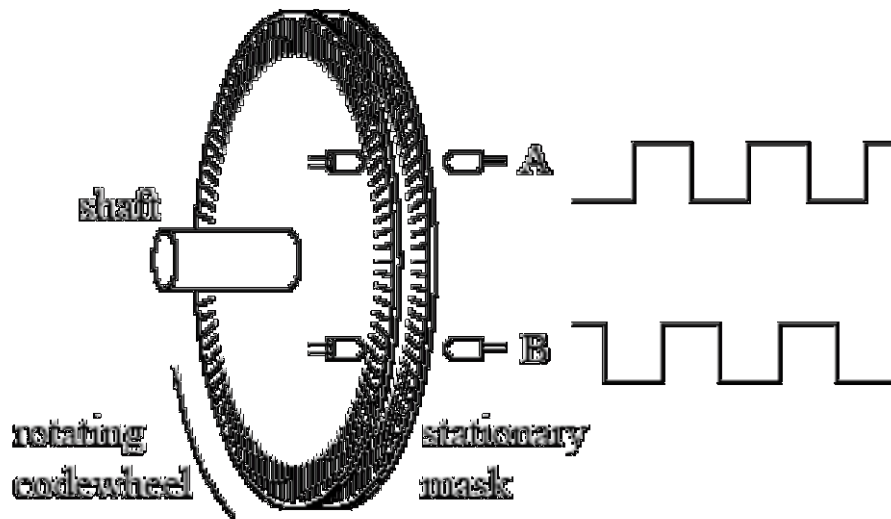
# Encoder incrementale



Contando gli impulsi e conoscendo il numero di tacche nel disco si può misurare la rotazione  
La frequenza del treno di impulsi è proporzionale alla velocità angolare  
Se  $n_c$  è il numero di tacche, la risoluzione è  $360^\circ/n_c$

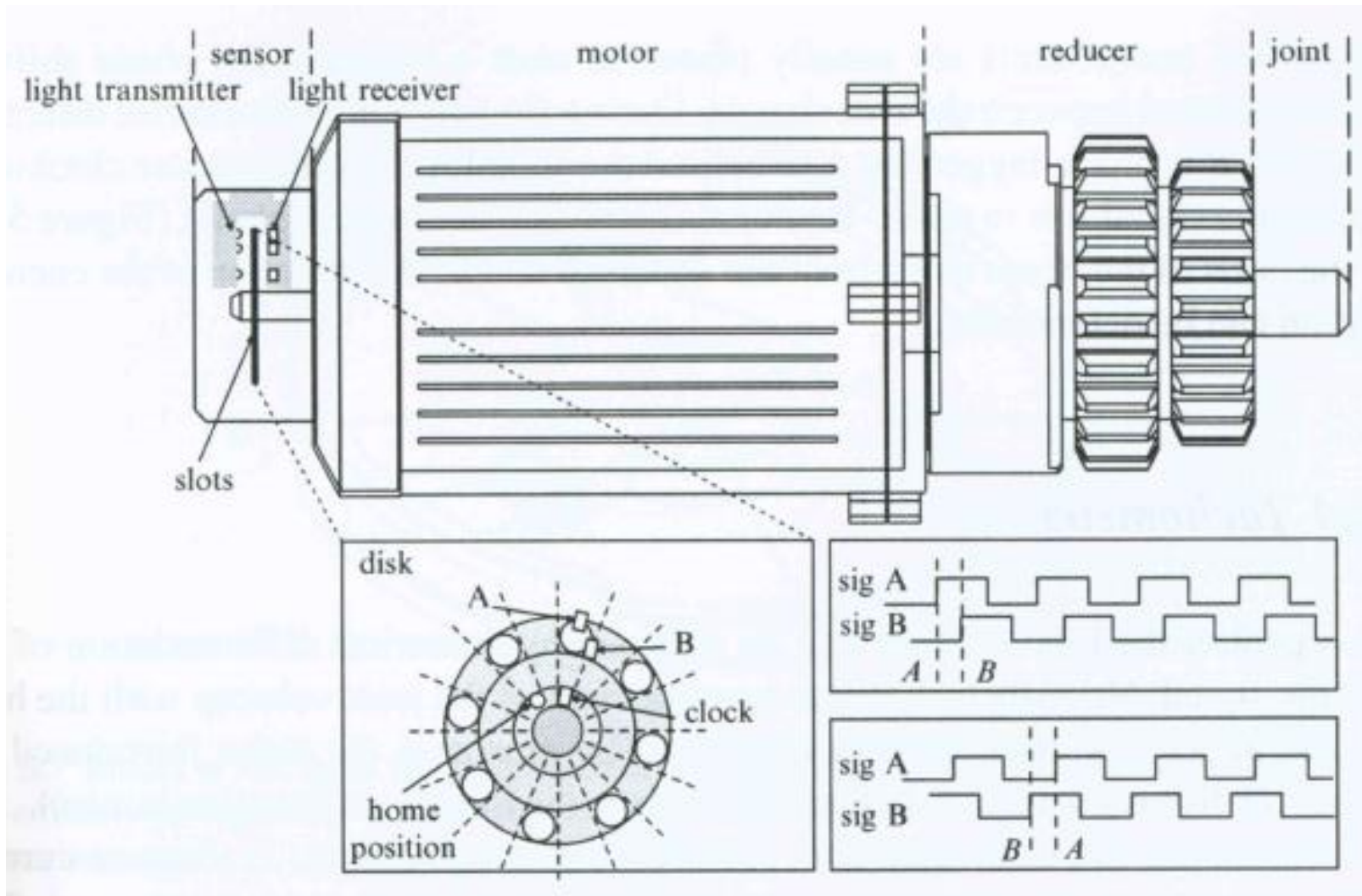
# Encoder incrementale

- Usando due fotointerruttori si può determinare il verso della rotazione, tramite la relazione tra le fasi dei loro treni di impulsi

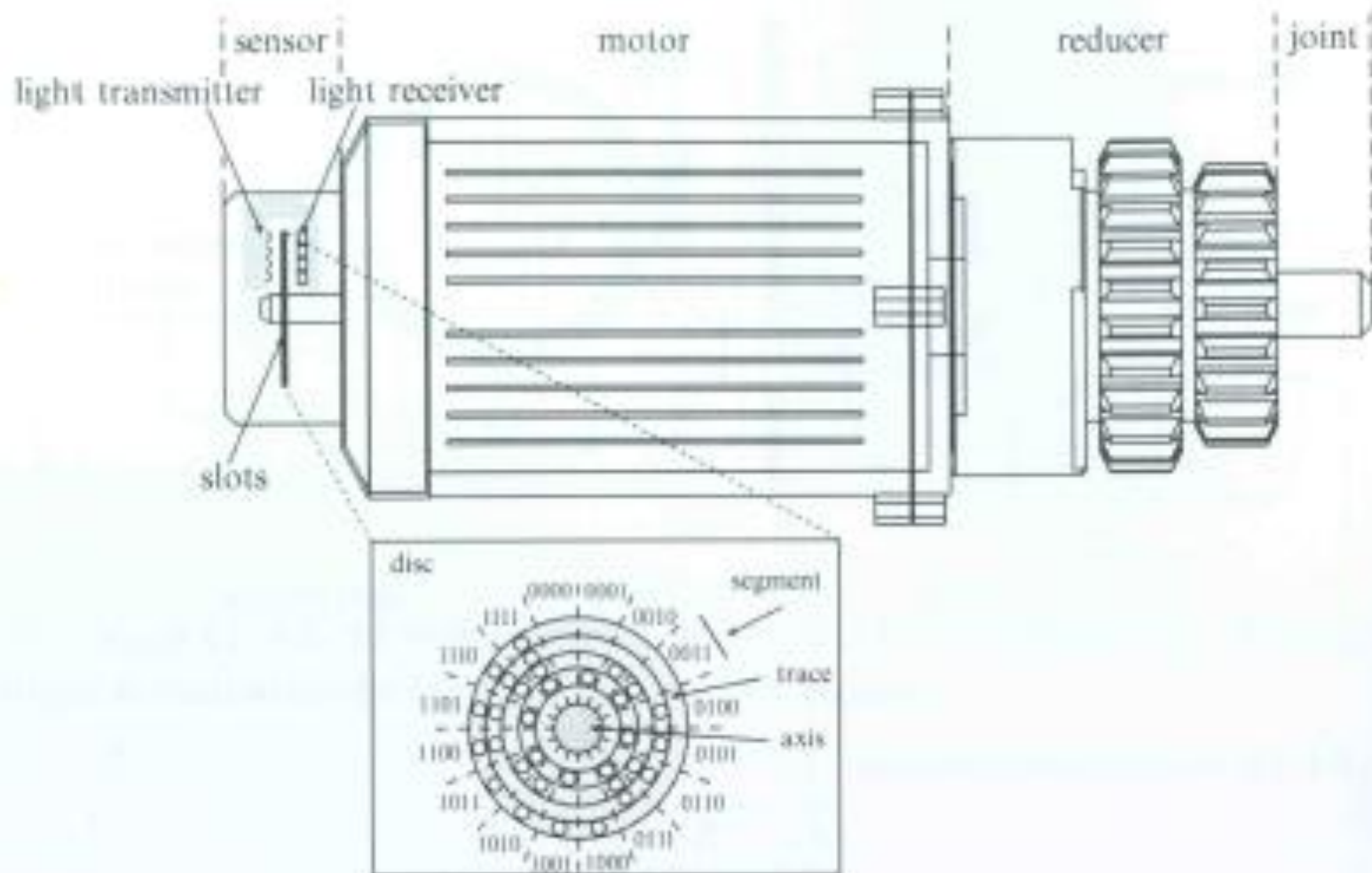


A e B sono sfasati di  $\frac{1}{4}$  di ciclo  
Una salita di A con B=0  
corrisponde a una rotazione in  
senso orario  
Una salita di A con B=1  
corrisponde a una rotazione in  
senso anti-orario

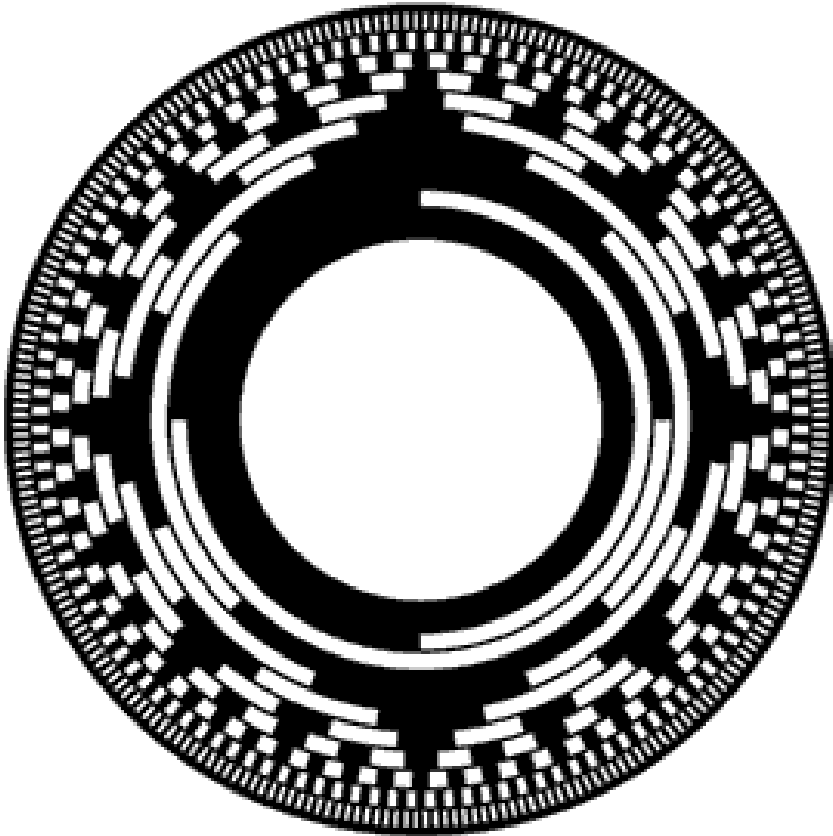
# Encoder incrementale



# Encoder assoluto



# Encoder assoluto



k fotointerruttori  
k tracce di codice  
Parola binaria a k bit, che  
rappresenta  $2^k$  diverse  
orientazioni del disco  
Risoluzione angolare di  $360^\circ/2^k$

- Fornisce l'angolo di rotazione assoluto
- Ogni posizione è determinata univocamente



# Encoder assoluto

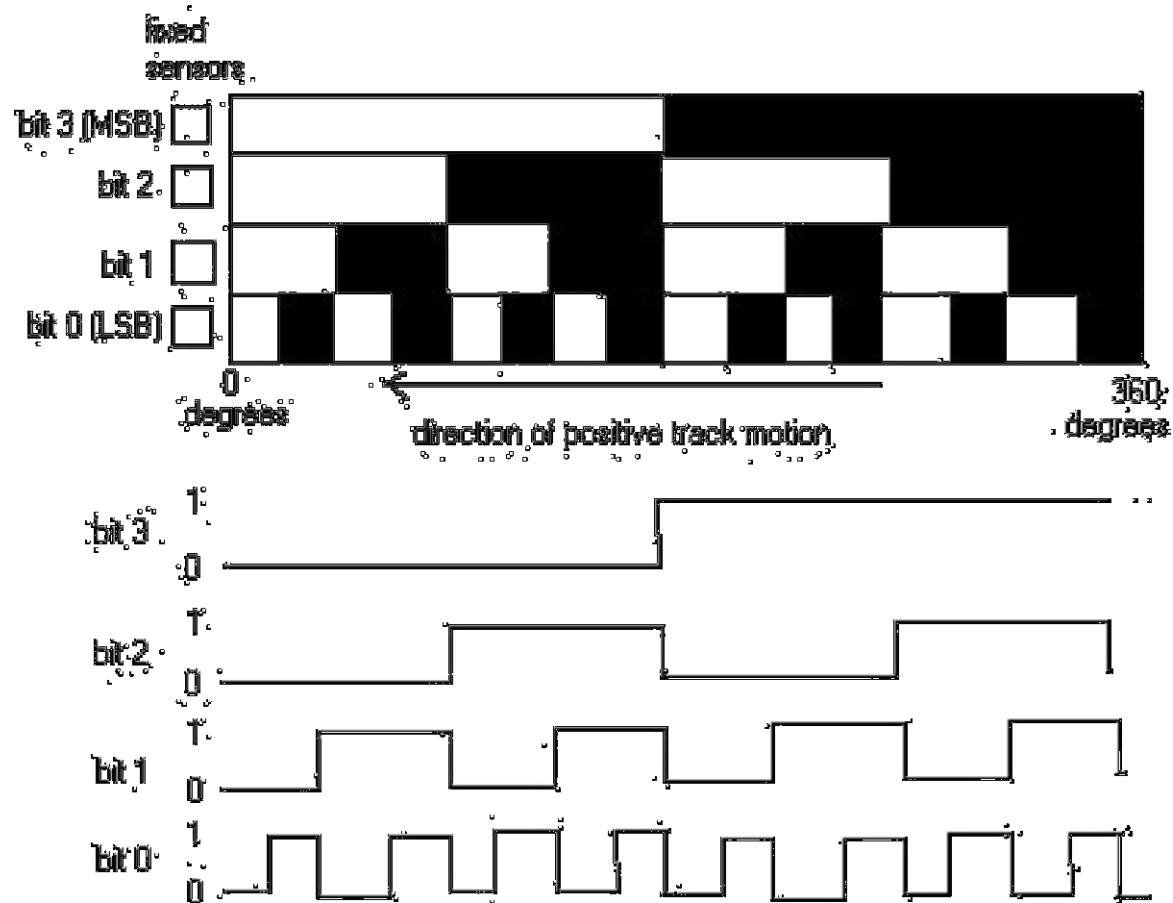
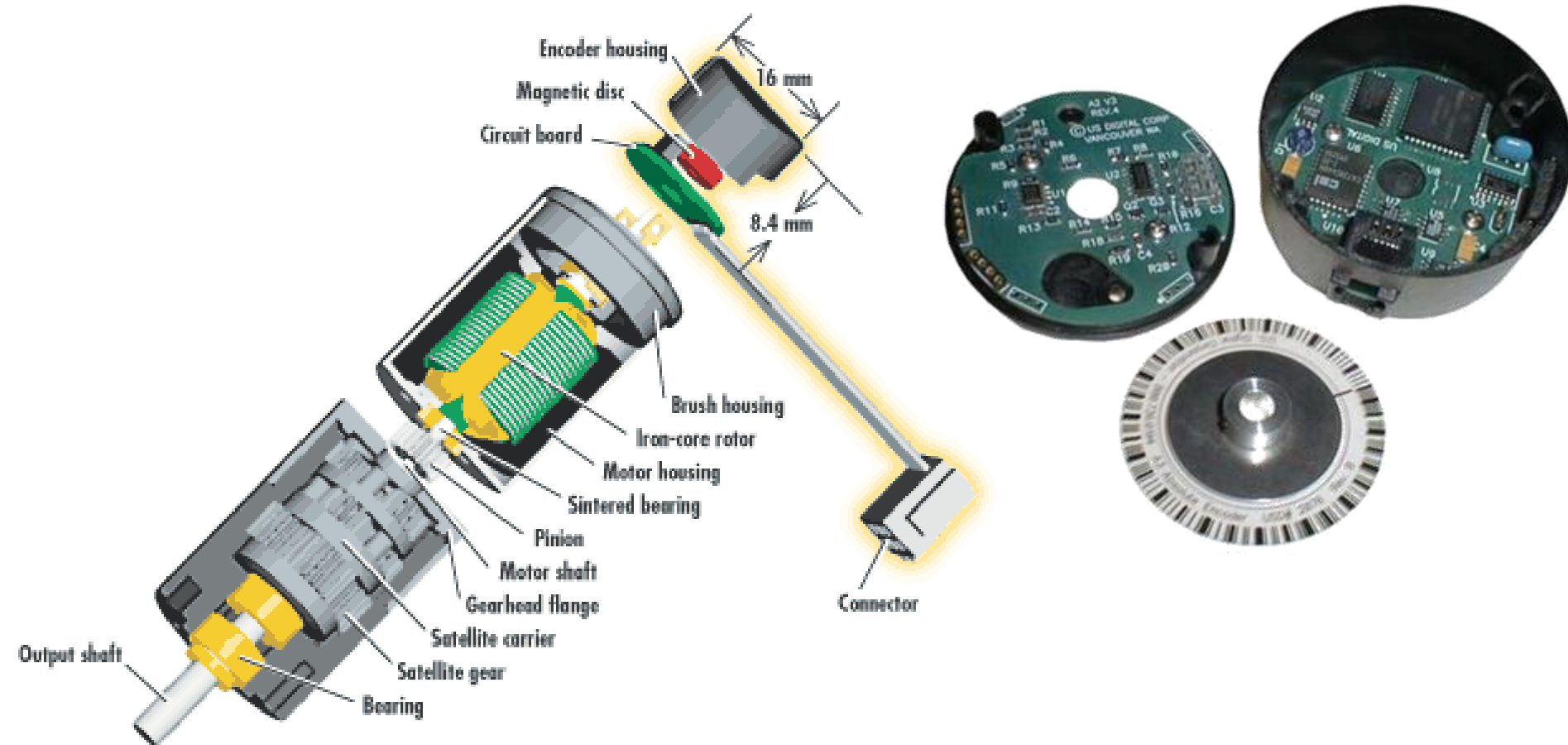


Fig 3 4-Bit binary code absolute encoder disk track patterns

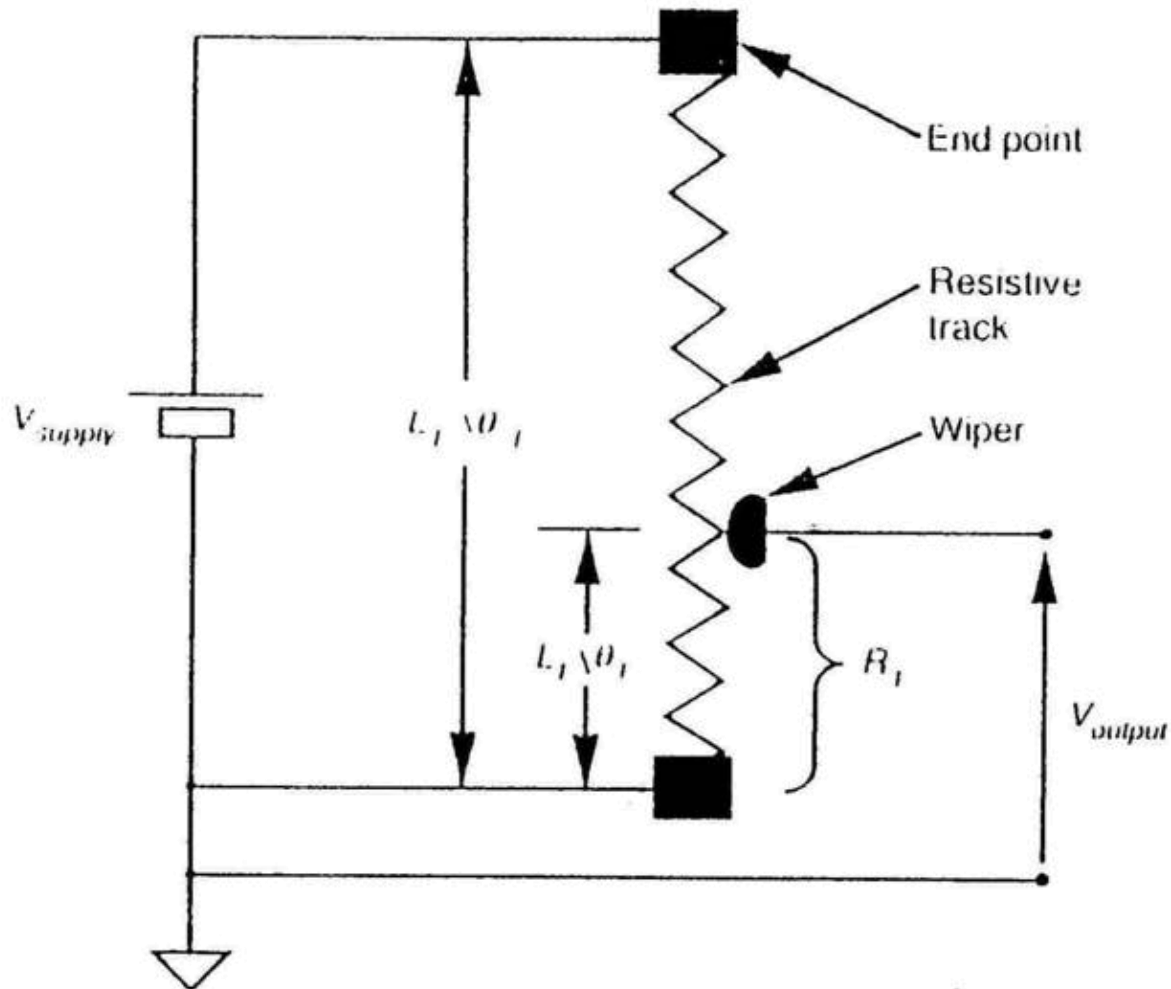




# Encoder



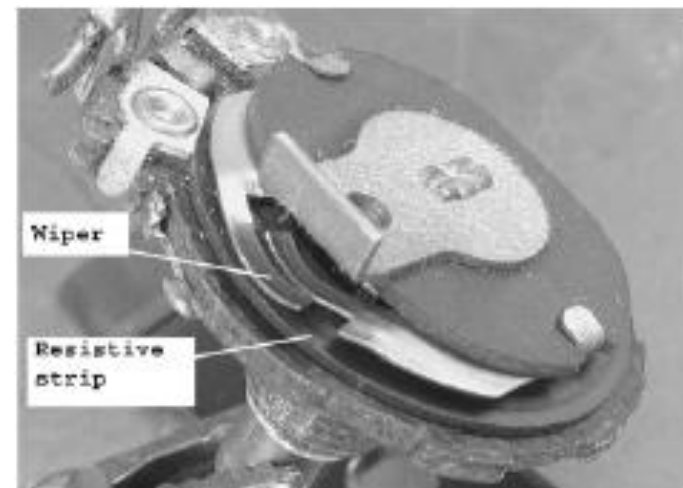
# Potenziometri



Resistenza variabile

$$\frac{L_1}{L_T} = \frac{R_1}{R_T} = \frac{V_{output}}{V_{supply}}$$

$$L_1 = R_1 L_T / R_T = V_{output} L_T / V_{supply}$$



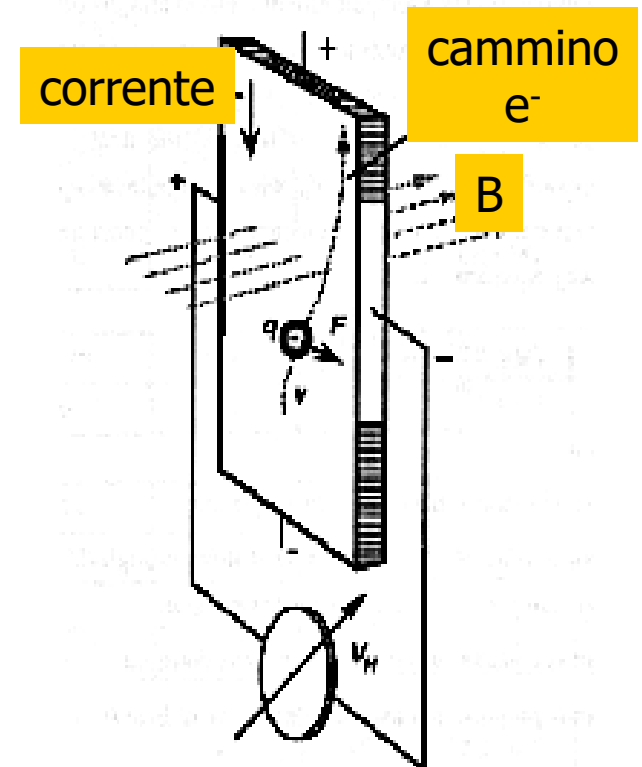
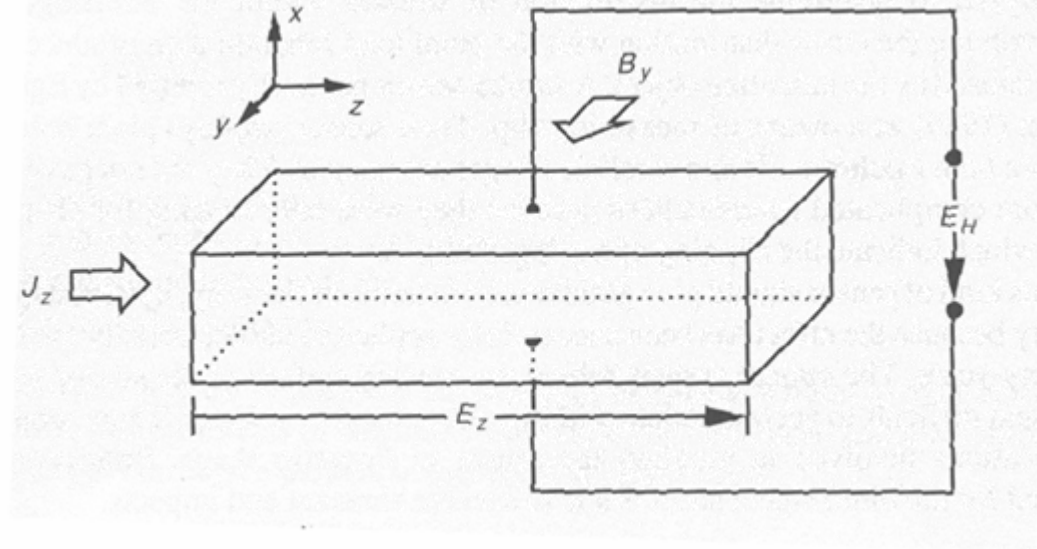
# Effetto Hall

In un conduttore a forma di lamina percorso da corrente  $i$  e soggetto ad un campo magnetico di intensità  $B$ , si origina una differenza di potenziale  $V$  in una direzione perpendicolare sia alla corrente che al campo magnetico.

Il valore di tale differenza di potenziale è proporzionale all'intensità di corrente  $i$  e all'intensità del campo magnetico  $B$ , mentre è inversamente proporzionale allo spessore della lamina  $d$ :

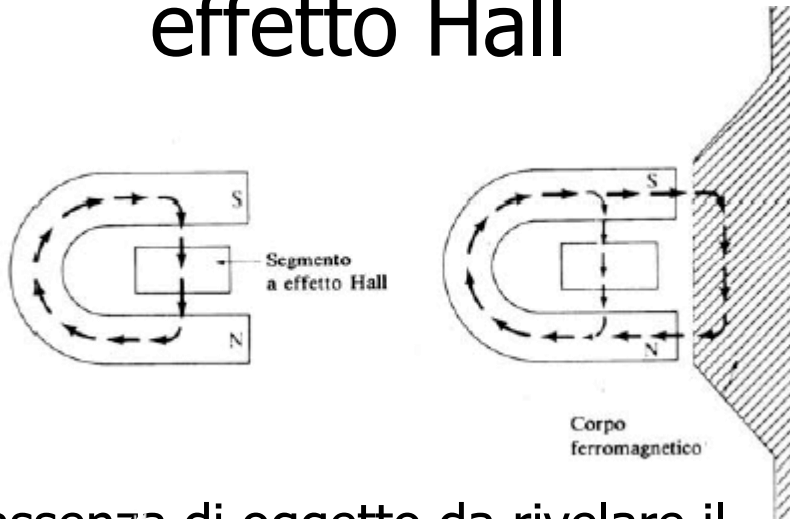
$$V = R i B / d$$

dove  $R$  è detta costante o coefficiente di Hall.

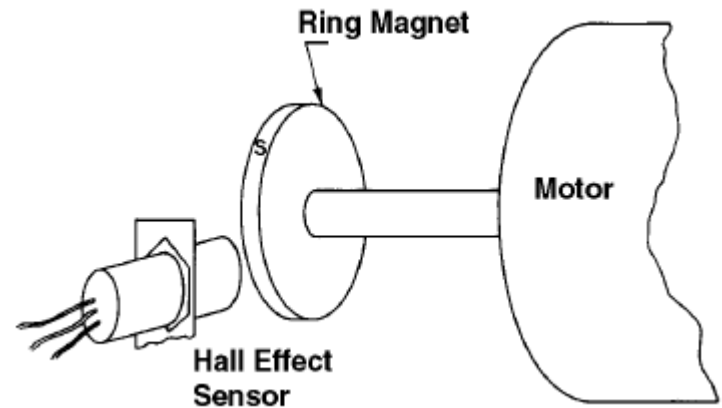


# Sensori a effetto Hall

## Sensore di prossimità a effetto Hall



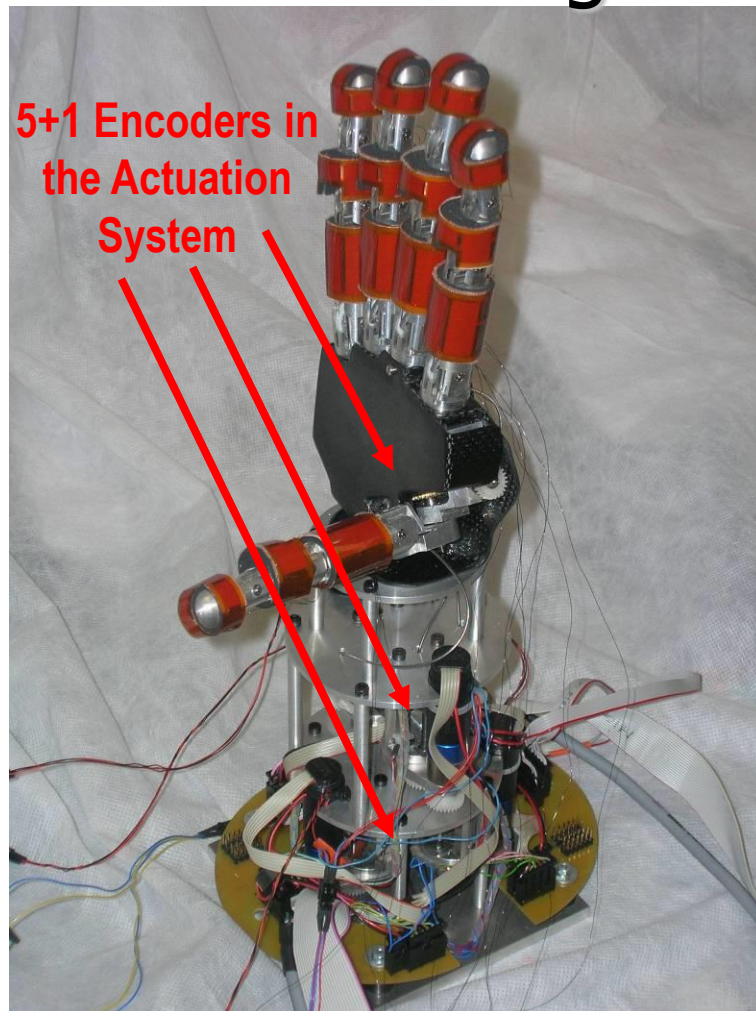
In assenza di oggetto da rivelare il sensore capta un forte campo magnetico emesso dal magnete permanente, mentre capta un campo più debole quando un oggetto ferromagnetico si trova nelle immediate vicinanze e varia la conformazione delle linee di forza



Esempio di applicazione  
come sensore di  
posizione

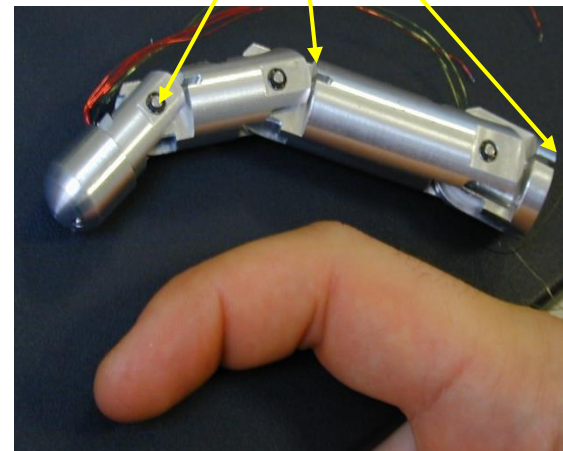
# Sensori a effetto Hall come sensori di posizione in robotica

## Detection of angular joint displacements



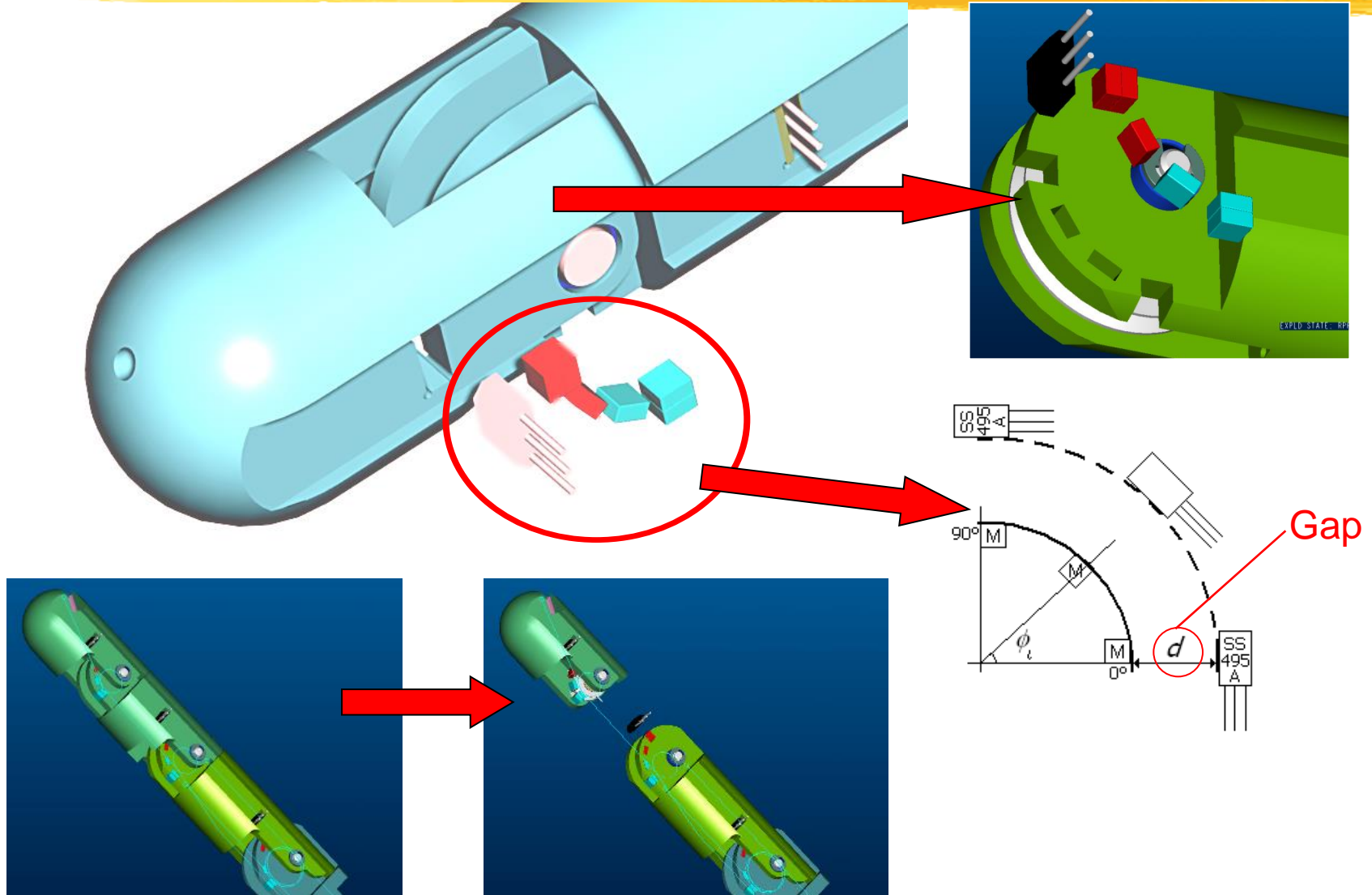
### 15 Embedded Joint Angle Sensors (Hall effect)

(Operational range: 0 – 90 degrees, Resolution: <5 degrees).





# Hall-effect joint angle sensors



# HUMANGLOVE

## Studia la postura della mano

MOTION  
LINE

Patent IT/PI1997A000026

**Humanglove** è un guanto sensorizzato a 22 gradi di libertà in grado di rilevare in tempo reale i movimenti della mano durante qualsiasi attività. Può essere utilizzato per applicazioni in Medicina, Neuro-Riabilitazione, Telerobotica e Realtà Virtuale.



**HumanGlove** è compatibile con lo standard di trasmissione dati Bluetooth. In questo modo, dopo averlo indossato è possibile muoversi liberamente, anche in ambienti esterni.

Il guanto è realizzato in materiale elastico e può essere indossato da utenti con mani di taglia diversa. Grazie ad una rapida operazione di calibrazione è possibile adattare le letture dei sensori per un nuovo utente ed i parametri di calibrazione possono essere salvati e riutilizzati successivamente.

Il software mostra i dati in formato numerico, analogico e grafico.



Modulo sensore (brevettato)



### INDOSSABILITÀ

- Il dispositivo offre un elevato comfort grazie all'impiego di tessuti sintetici leggeri ed elastici e all'ingombro molto ridotto dei componenti.
- Il peso complessivo è ca. 290g
- Il sistema può anche lavorare in un ambiente non dedicato (ad es. all'aperto) perchè non necessita di collegamento via cavo.

**HumanGlove** fa uso di ventidue sensori:

- tre sensori di flessione-estensione ed un sensore di abduzione-adduzione per ciascun dito (pollice compreso)
- un sensore di flessione-estensione ed un sensore di abduzione-adduzione per il polso

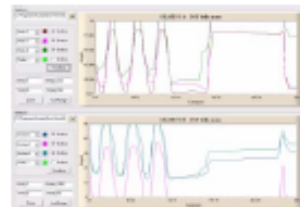
L'utilizzo di sensori ad effetto Hall garantisce una risposta lineare ed un elevato grado di robustezza e affidabilità.



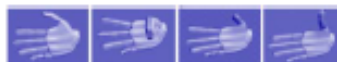
### CARATTERISTICHE DEL SISTEMA

- Accuratezza dei sensori: 0.1V / 2.5V
- Linearità dei sensori: < 2.0%
- Range dei sensori: > 110°
- Converter: 12 bit A/D
- Alimentazione: 4 batterie AAA
- Trasmissione dati: Bluetooth
- Freq. campionamento: max 100 Hz

La connessione Bluetooth concede all'utente ampia libertà di movimento. La connessione alla periferica avviene attraverso una porta seriale virtuale RS-232 su USB; in questo modo essa può essere collegata a qualsiasi tipo di workstation.



**Humanware** è una società costituita da specialisti in varie discipline, dall'ingegneria meccanica all'informatica ed è una spin off della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa.



# Esempio di applicazione di sensori a effetto Hall

## Guanto sensorizzato per rilevare la posizione delle dita



Modulo sensore (brevettato)



**Humanware**  
S.p.A.

Via Garibaldi, 1 - 56126 Pisa (P)  
Tel: +39 050 576023 - Fax: +39 050 973270  
web: www.humanware.it - email: info@humanware.it



RINA  
Certified





# Sommario della lezione



- Proprietà fondamentali dei sensori
- Sensori di posizione: switch, encoders, potenziometri, sensori a effetto Hall
- Misurazione della distanza: triangolazione, tempo di volo
- Sensori di distanza e di prossimità: sensori a ultrasuoni, laser, a effetto Hall e a infrarossi
- Sensori di forza: strain gauge e sensori di forza/coppia
- Sensori di accelerazione e velocità

# Misurazione della distanza: triangolazione



Se due dispositivi a distanza nota possono 'puntare' lo stesso punto di un oggetto, allora la distanza dell'oggetto può essere calcolata conoscendo gli angoli di puntamento.

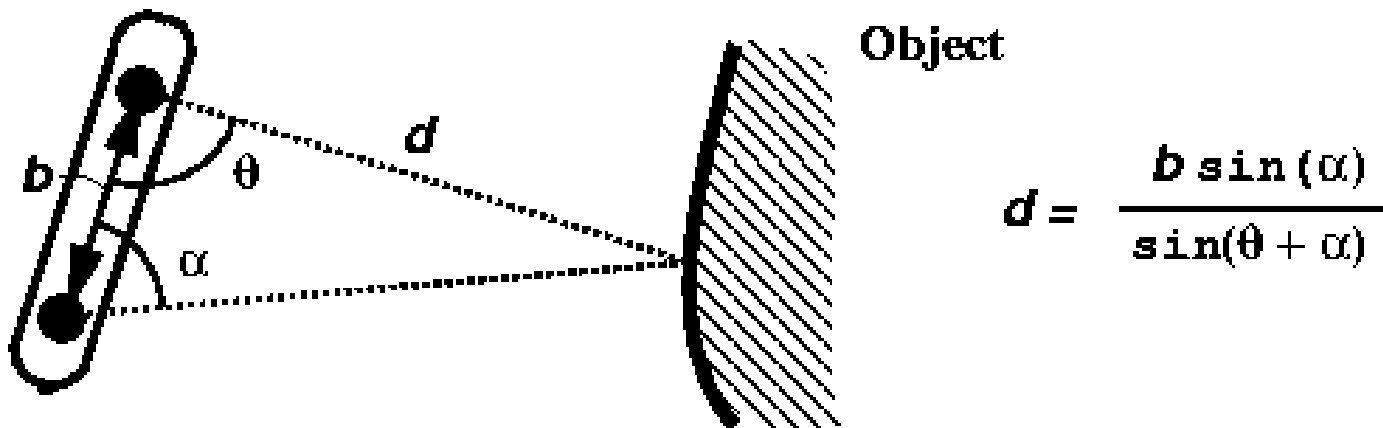
**TRIANGOLAZIONE PASSIVA:** utilizza due dispositivi di acquisizione di immagini

**TRIANGOLAZIONE ATTIVA:** utilizza un dispositivo di acquisizione di immagini ed una sorgente di luce controllata

# Sensori di DISTANZA o RANGE o PROFONDITA'

Il range (o profondità) è la distanza tra il sensore e l'oggetto rilevato. La percezione del range è importante per il riconoscimento degli oggetti e dell'ambiente e nel controllo della navigazione di un robot; spesso è usato, anche insieme ad un sistema di visione, per ricostruire il modello 3D di una scena

Il principio fisico alla base della percezione del range è la **triangolazione**, ovvero la rilevazione di un oggetto da due punti di vista differenti ad una distanza nota l'uno dall'altro



# Misurazione della distanza: tempo di volo

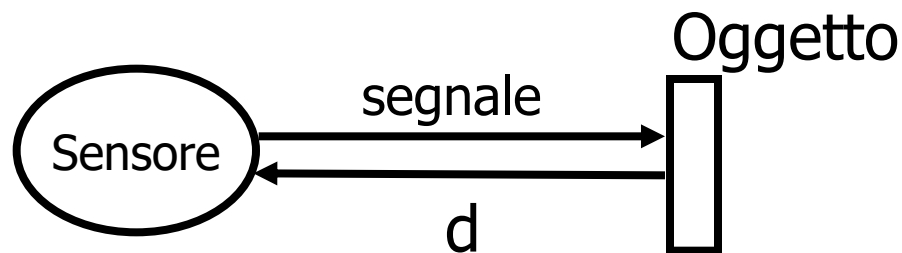
La misura della distanza di un oggetto è data dalla misura del tempo che un dato segnale (ad es. un impulso sonoro) impiega a raggiungere l'oggetto e a tornare indietro

$$d = (v \times t)/2$$

$d$  = distanza dell'oggetto

$v$  = velocità del segnale

$t$  = tempo impiegato dal segnale per raggiungere l'oggetto e tornare indietro



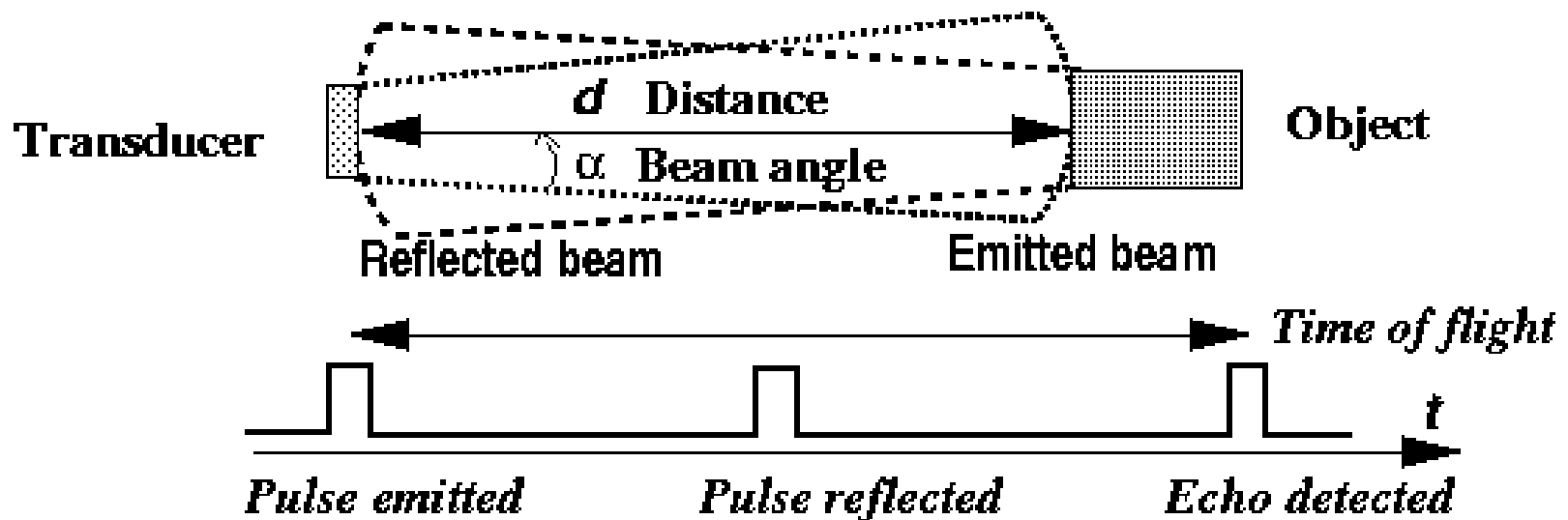
# Misurazione della distanza: tempo di volo

(esempio: ultrasuoni)

$$d = 0.5 t_e v$$

$v$  è la velocità media degli impulsi emessi

$t_e$  è il tempo che intercorre da quando l'impulso è stato emesso alla ricezione della sua eco.

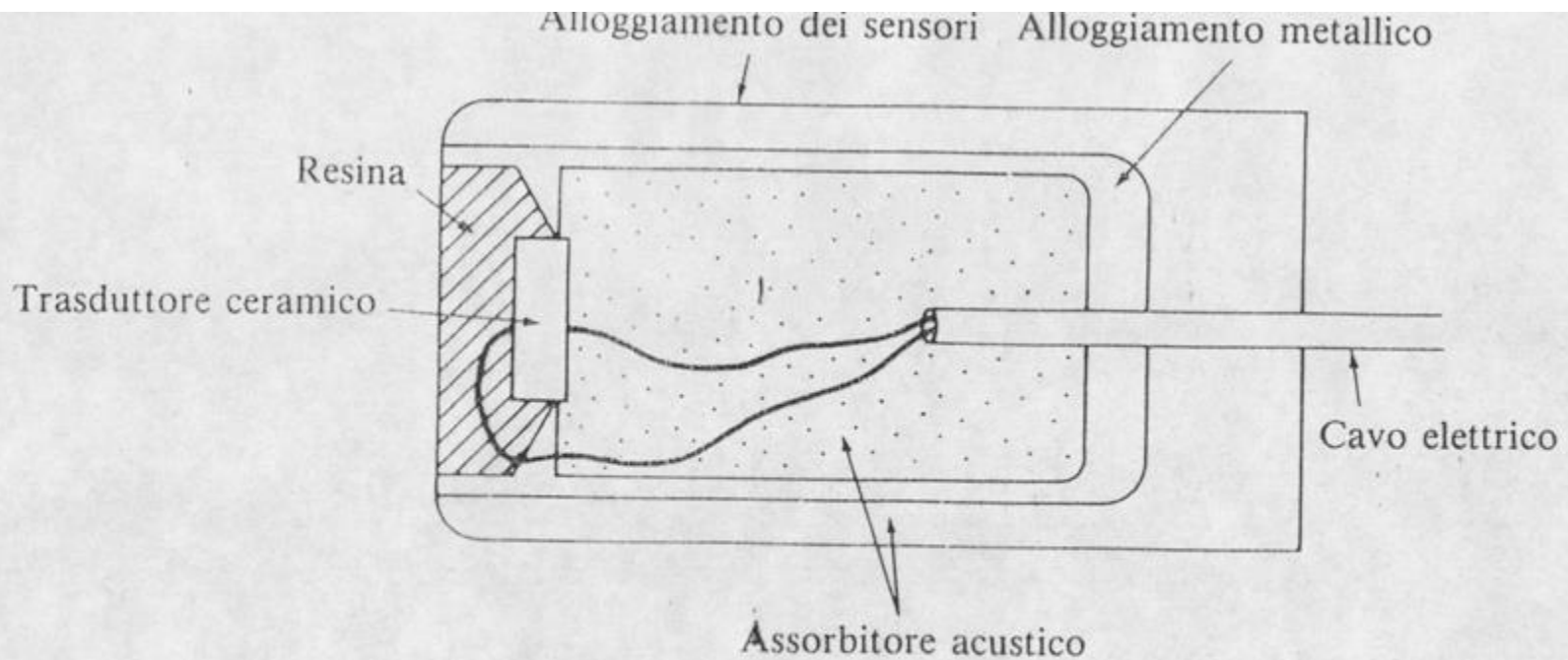


# Sommario della lezione



- Proprietà fondamentali dei sensori
- Sensori di posizione: switch, encoders, potenziometri, sensori a effetto Hall
- Misurazione della distanza: triangolazione, tempo di volo
- Sensori di distanza e di prossimità: sensori a ultrasuoni, laser, a effetto Hall e a infrarossi
- Sensori di forza: strain gauge e sensori di forza/coppia
- Sensori di accelerazione e velocità

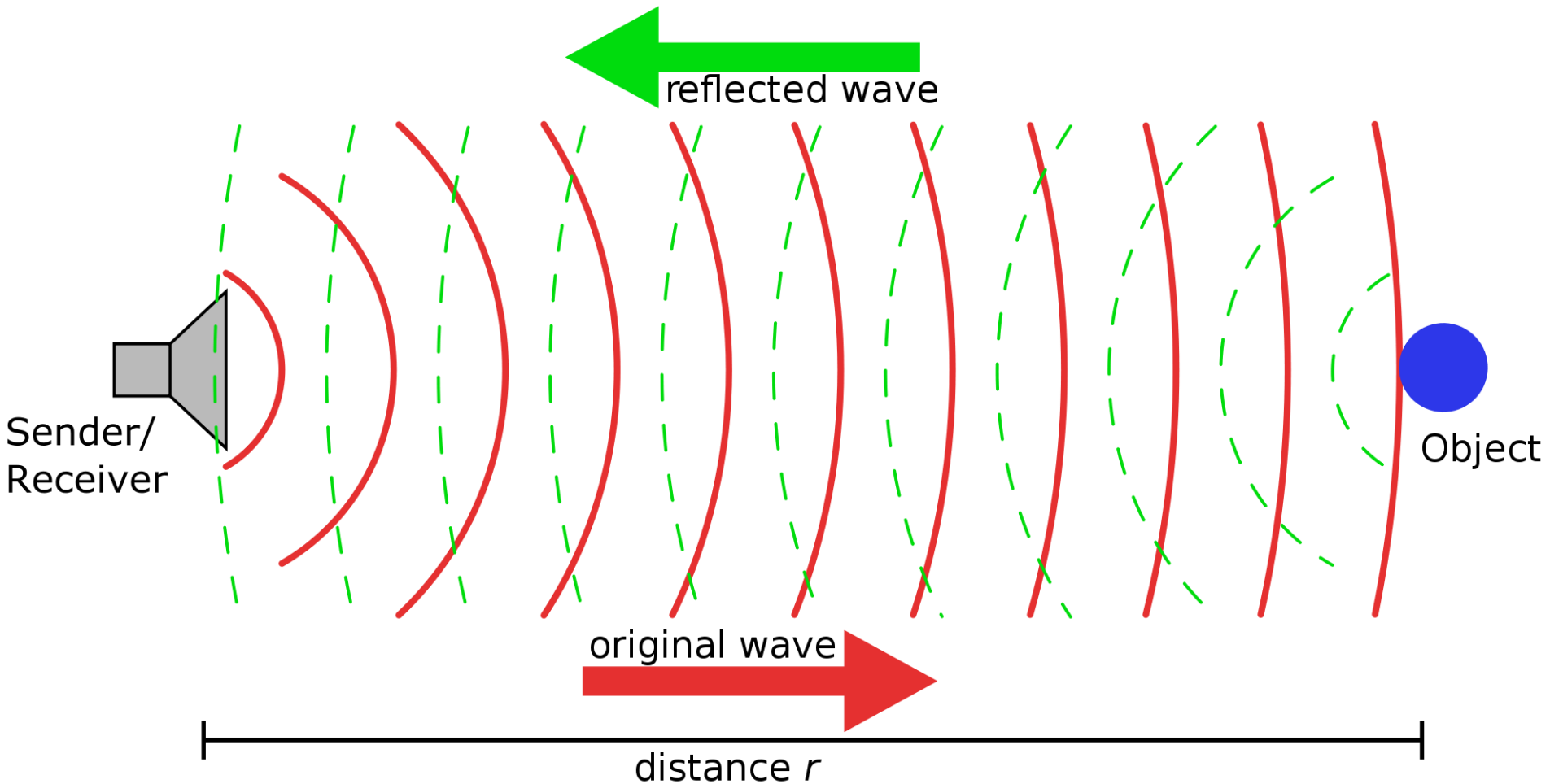
# Sensori ad ultrasuoni



**Figura 6.14** Sensore di prossimità a ultrasuoni. (Adattata da Canali [1981b], © Elsevier Sequoia).



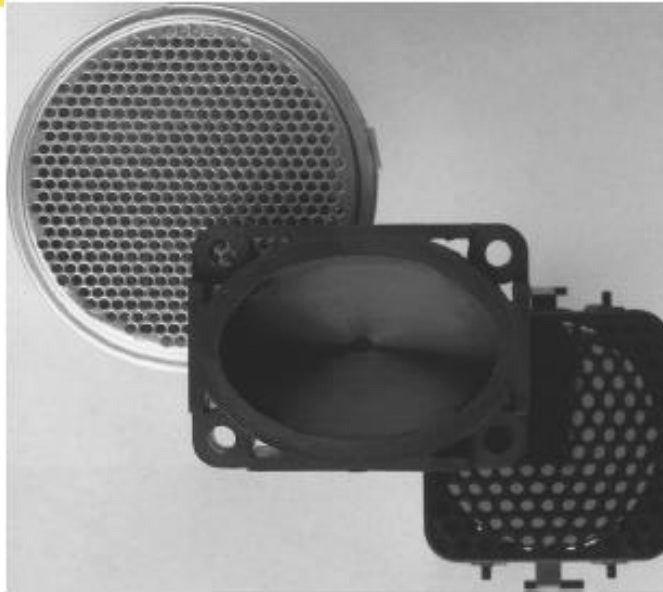
# Sensori ad ultrasuoni



# Sensori ad ultrasuoni

2 componenti principali:

- trasduttore di ultrasuoni (che funziona sia da emettitore che da ricevitore)
- elettronica per il calcolo della distanza



Range:

da 0.3m a 10.5m

Ampiezza del fascio:  
30°

Accuratezza:

ca. 25mm

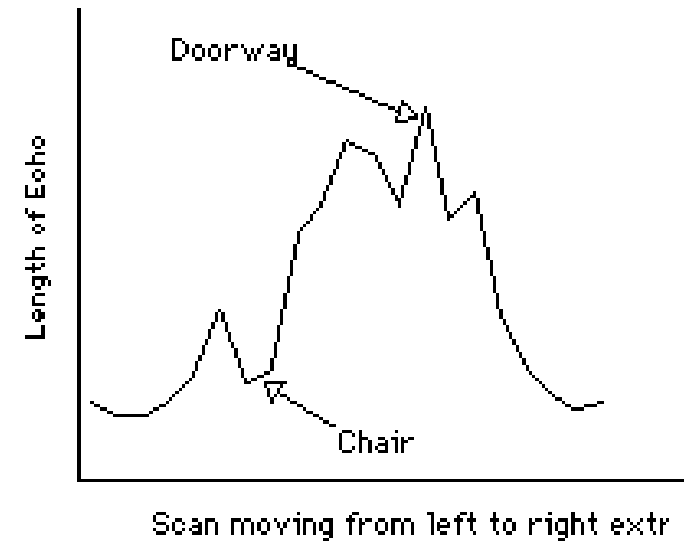
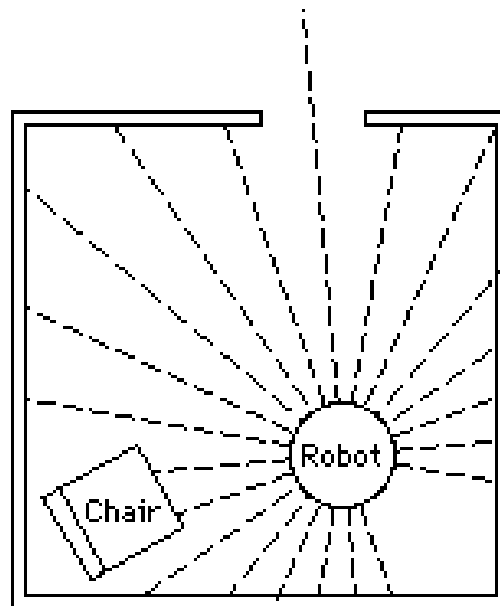
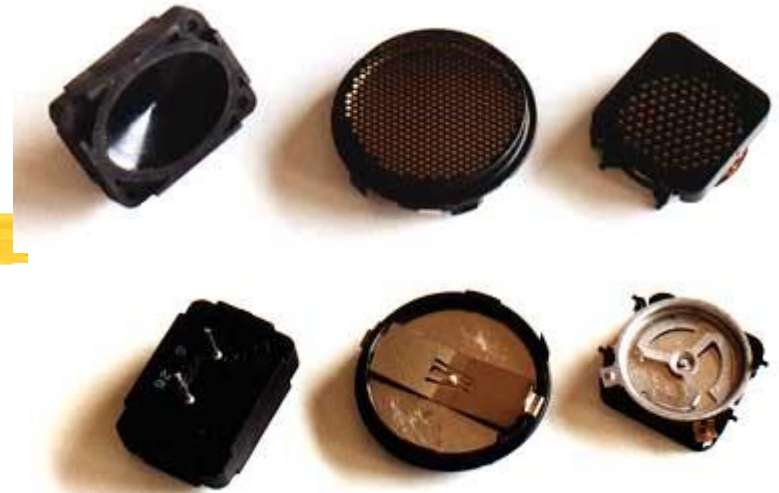
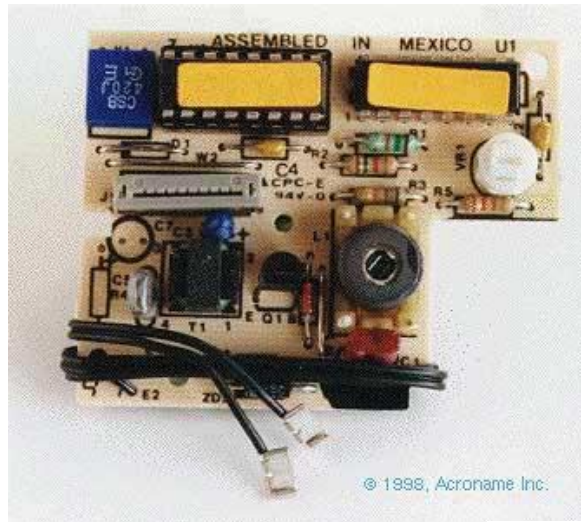
Ciclo operativo tipico:

- l'elettronica di controllo fa inviare ultrasuoni al trasduttore
- il ricevitore viene disabilitato per un intervallo di tempo, per evitare false risposte dovute a segnale residuo nel trasduttore
- il segnale ricevuto viene amplificato con un guadagno crescente, per compensare la diminuzione di intensità con la distanza
- eco di ritorno che superano una certa soglia vengono presi in considerazione e associati a delle distanze calcolate in base al tempo trascorso dalla trasmissione

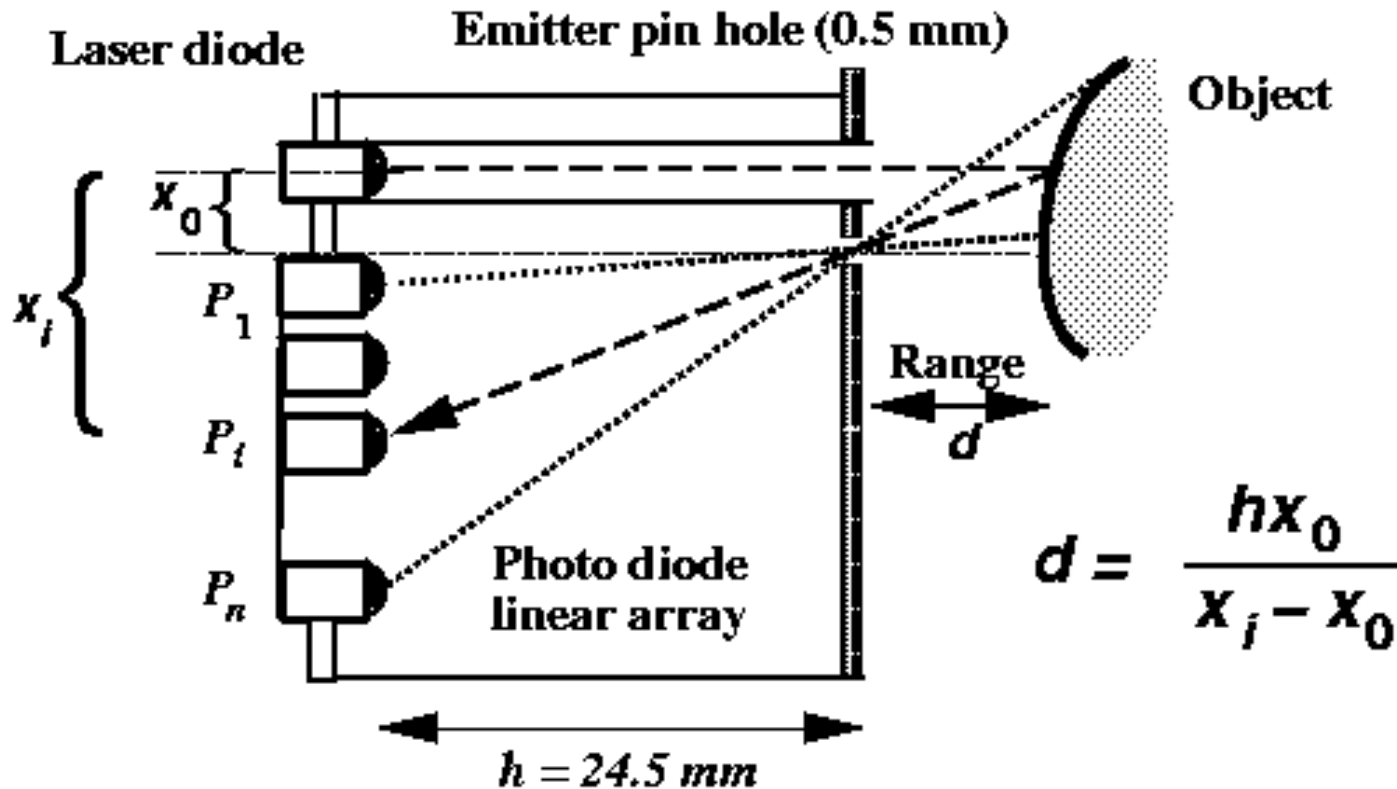
# Esempi di applicazione di sensori ad ultrasuoni su robot mobili



# B21 US sensors

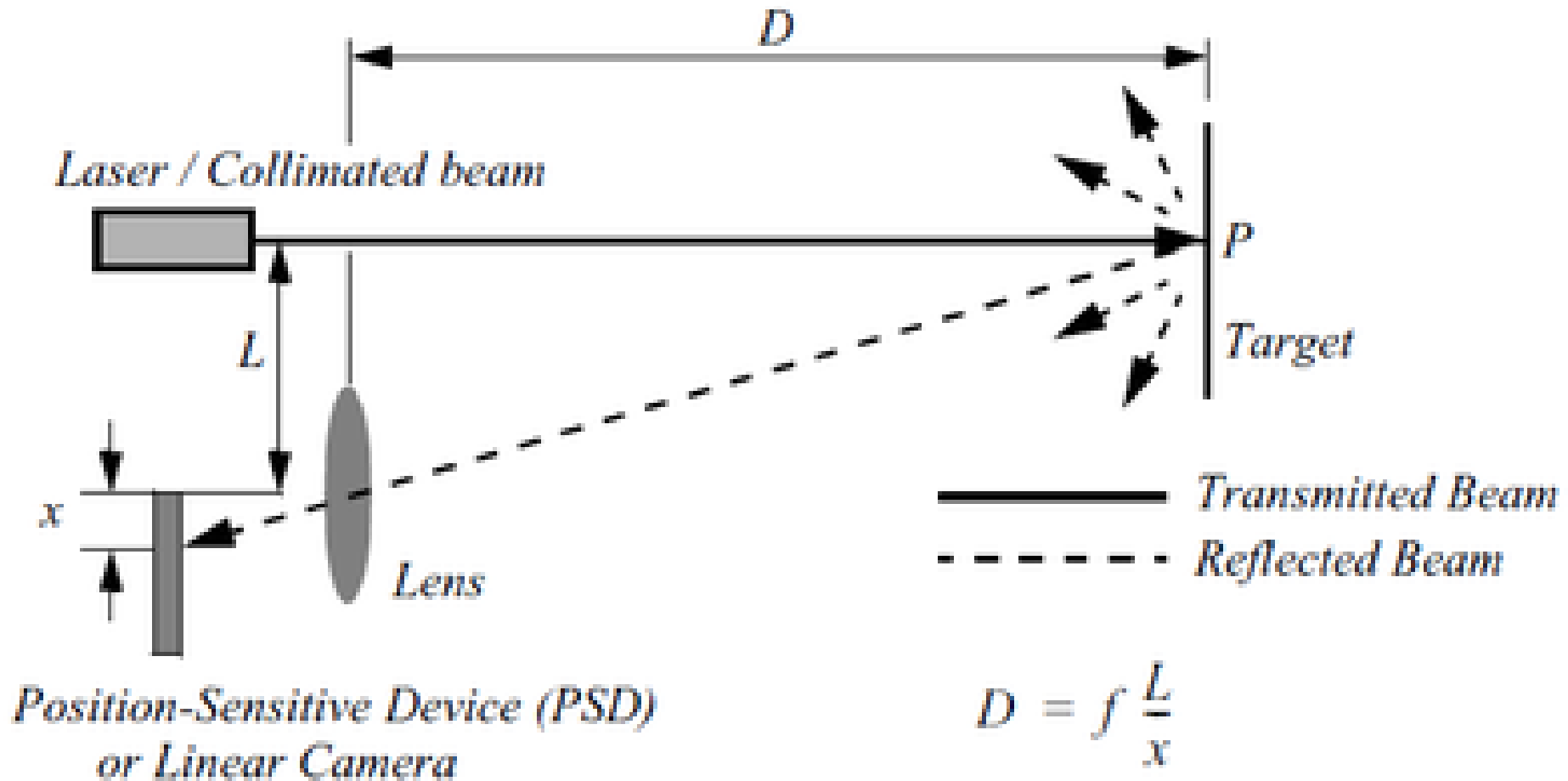


# LASER RANGE FINDERS



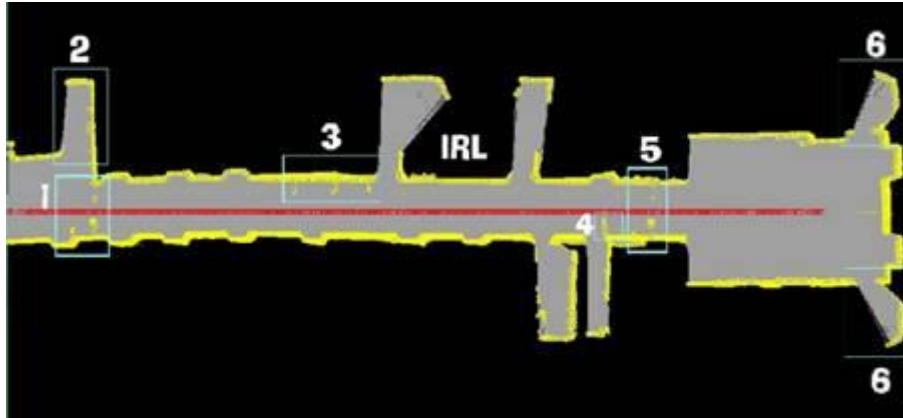
A simple **pin-hole short-range-finding sensor** uses a laser diode as a light source, and a linear photo-diode array as a detector. The range from a sensor to the object is a function of the position of the maximum detected light along the array.

# LASER RANGE FINDERS





# B21 LaserFinder LMS 200



Map building using the LMS 200 laser scanner



## Technical specification

	Angular Resolution		1° / 0,5 ° / 0,25°
	Response Time (ms)		13 / 26 / 53
	Resolution (mm)		10
	Systematic Error (mm mode)		+/- 15 mm
	Statistic Error (1 Sigma)		5 mm
	Laser Class		1
	Max. Distance (m)		80
	Data Interface		RS422 / RS232

# Sensori di prossimità



Percezione della presenza di un oggetto in un certo intorno spaziale

- Sensori a effetto Hall
- Sensori ottici, a infrarossi



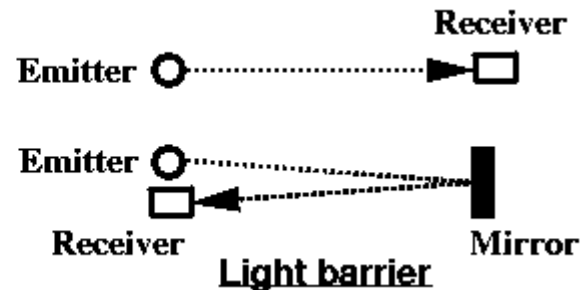
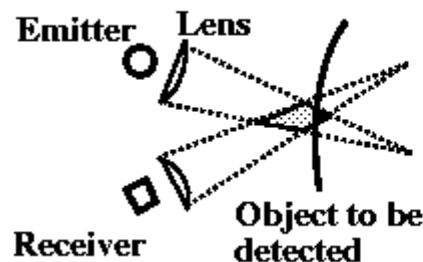
# SENSORI DI PROSSIMITA'

**Sensori di prossimità passivi:** rilevano perturbazioni nell'ambiente, come ad esempio modifiche del campo magnetico o elettrico

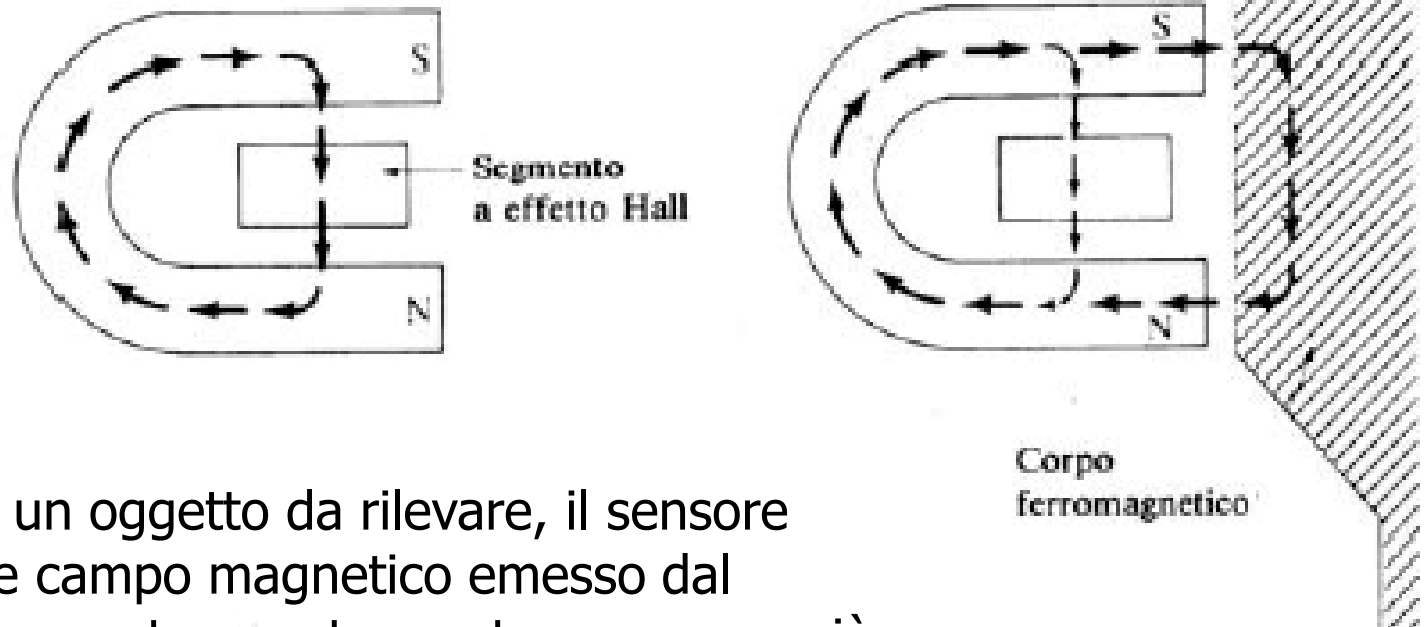
ES: sensori passivi a campo magnetico: sensori ad effetto hall

**Sensori di prossimità attivi:** sfruttano i cambiamenti che avvengono ad un segnale emesso, che possono avvenire in seguito all'interruzione o alla riflessione del cammino del segnale verso il ricevitore

ES: sensori ottici attivi: emettitore e ricevitore di segnale luminoso

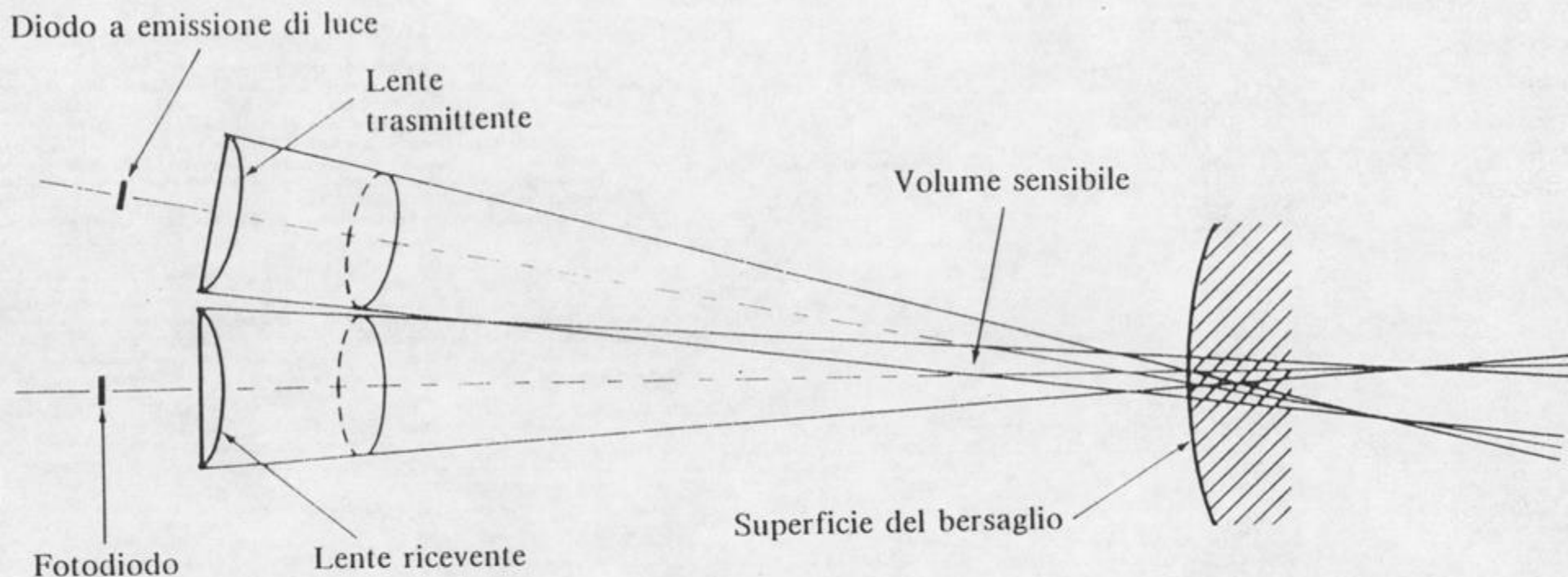


# Sensore di prossimità a effetto Hall



In assenza di un oggetto da rilevare, il sensore capta un forte campo magnetico emesso dal magnete permanente, mentre capta un campo più debole quando un oggetto ferromagnetico si trova nelle immediate vicinanze e varia la conformazione delle linee di forza

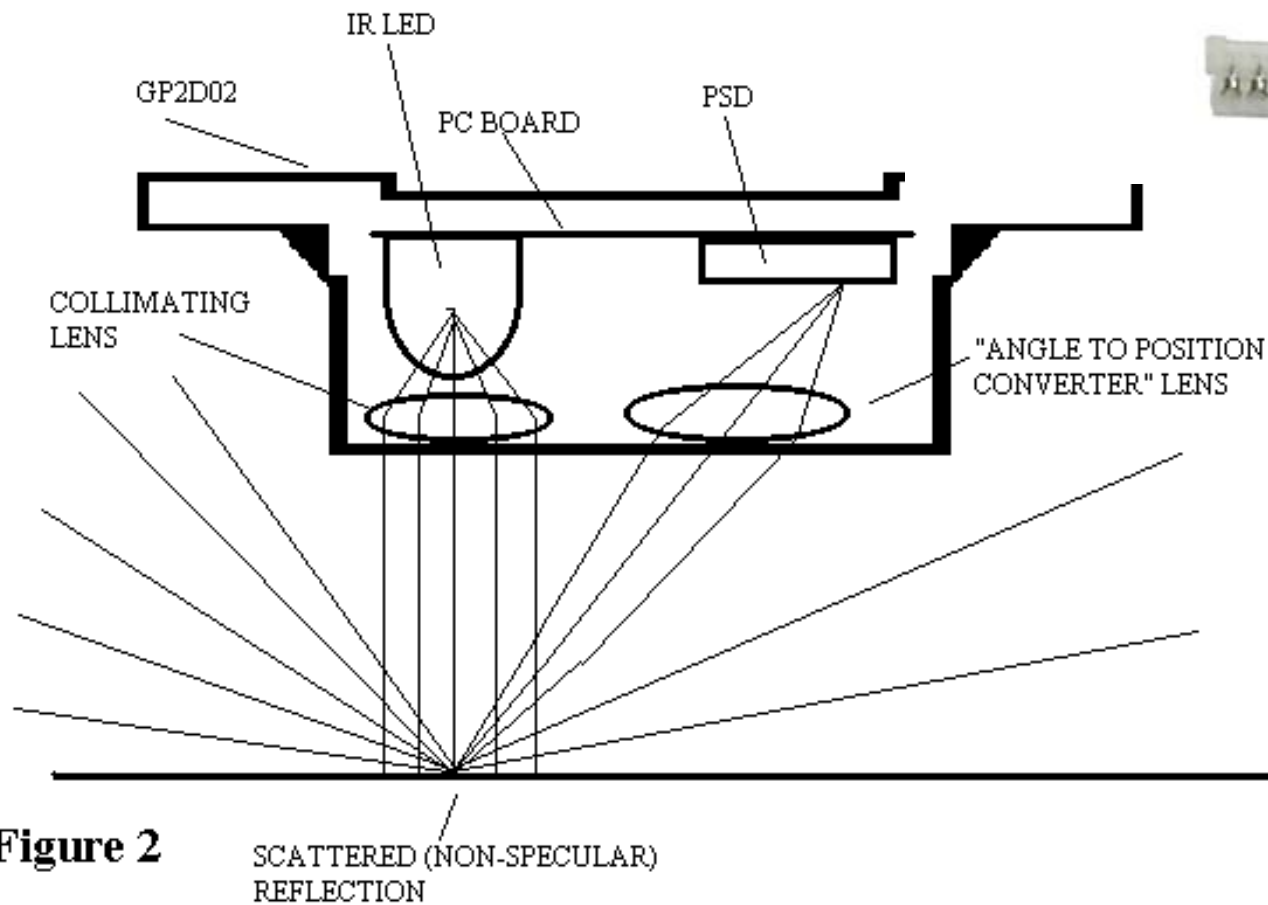
# Sensori di prossimità ottici



**Figura 6.16** Sensore ottico di prossimità. (Da Rosen e Nitzan [1977], © IEEE).

# B21 IR sensors

Sharp GP2D02 IR Distance Measuring Sensor



**Figure 2**

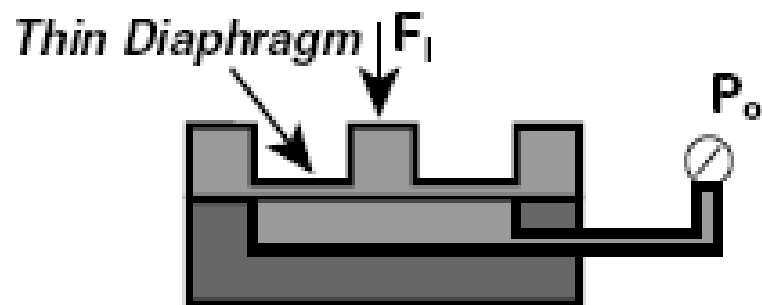
# Sommario della lezione



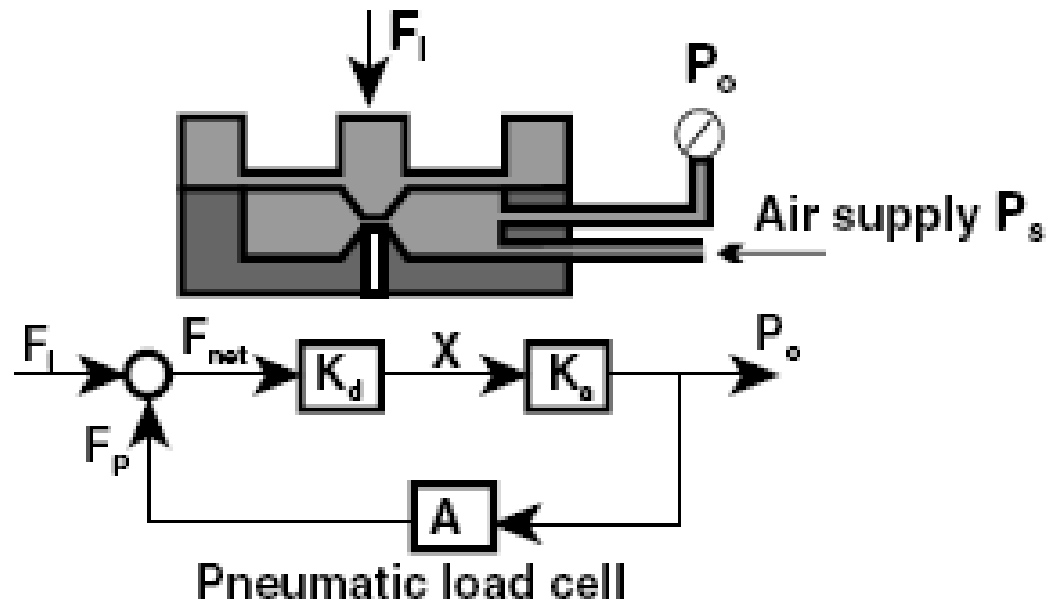
- Proprietà fondamentali dei sensori
- Sensori di posizione: switch, encoders, potenziometri, sensori a effetto Hall
- Misurazione della distanza: triangolazione, tempo di volo
- Sensori di distanza e di prossimità: sensori a ultrasuoni, laser, a effetto Hall e a infrarossi
- Sensori di forza: strain gauge e sensori di forza/coppia
- Sensori di accelerazione e velocità

# Strutture a celle di carico

- Struttura esterna rigida
- Mezzo per misurare la forza applicata
- Elemento misuratore

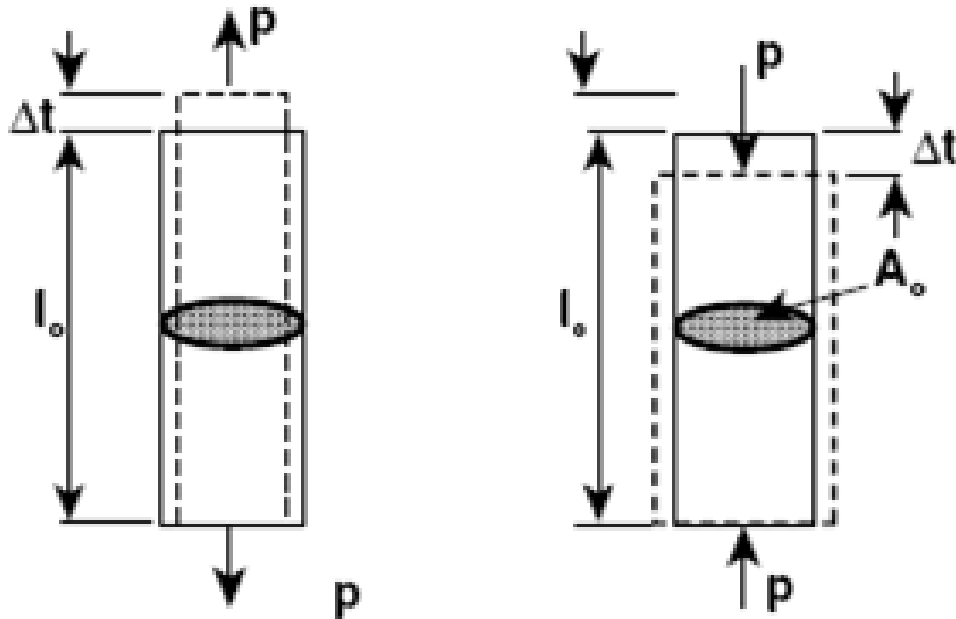


Hydraulic load cell



# Richiami di comportamento meccanico dei materiali

Un materiale sottoposto a uno sforzo si deforma con comportamento elastico fino a una soglia dello sforzo (limite elastico), oltre la quale si deforma plasticamente



*sforzo*

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

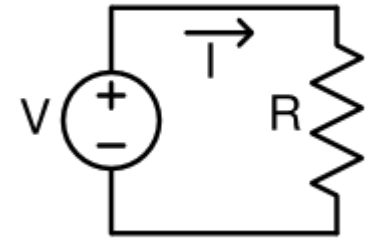
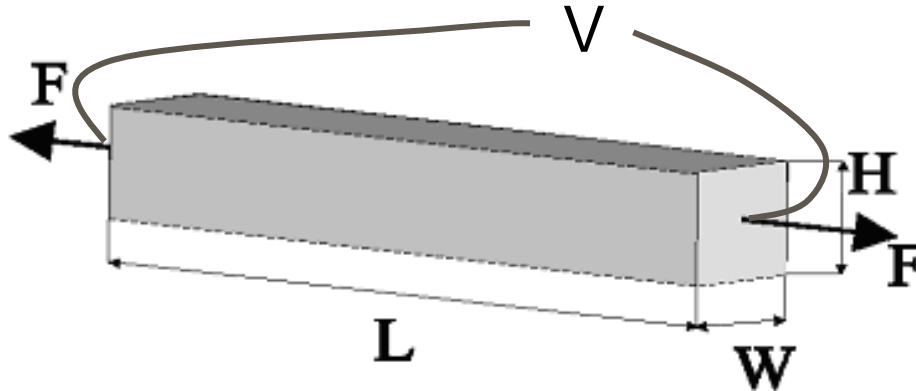
*deformazione*

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Rapporto di Poisson:  $\nu = -\frac{\frac{\delta A}{A_0}}{\varepsilon}$       Modulo di elasticità:  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

# Effetto piezoresistivo

Ogni materiale varia la propria resistenza elettrica in funzione della **deformazione**



$$V=RI$$

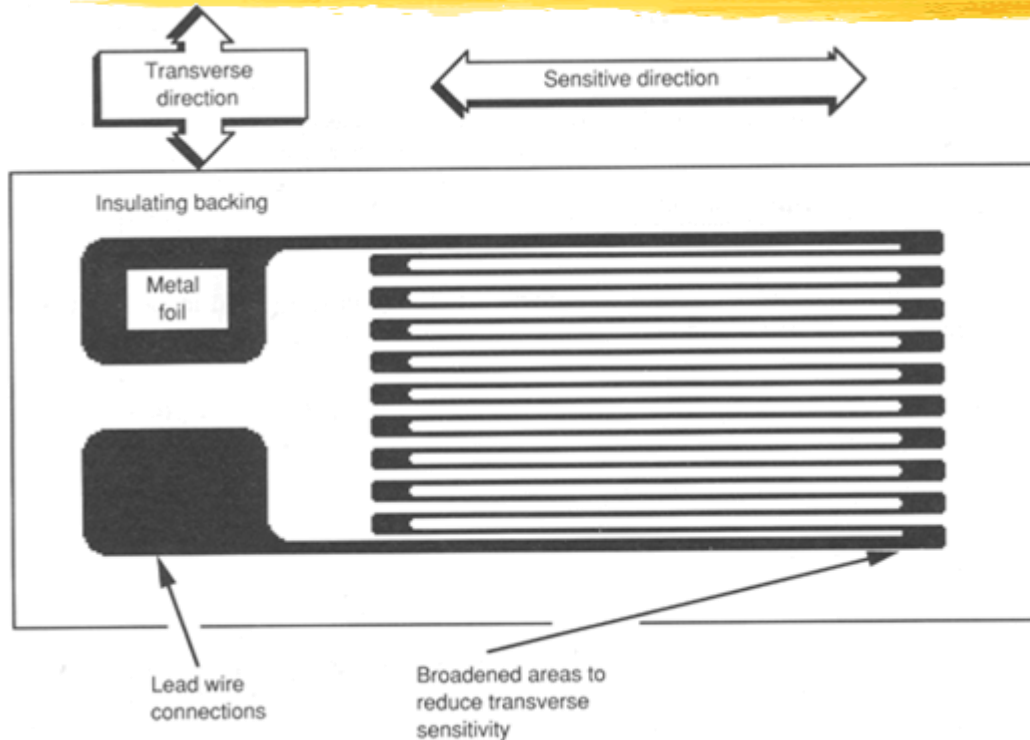
In un parallelepipedo metallico:  $R = \rho \frac{L}{WH}$   
con  $\rho$  = resistività del materiale,  
 $L, W, H$  = dimensioni del parallelepipedo

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

$\nu$  = rapporto di Poisson del materiale



# Strain gauge

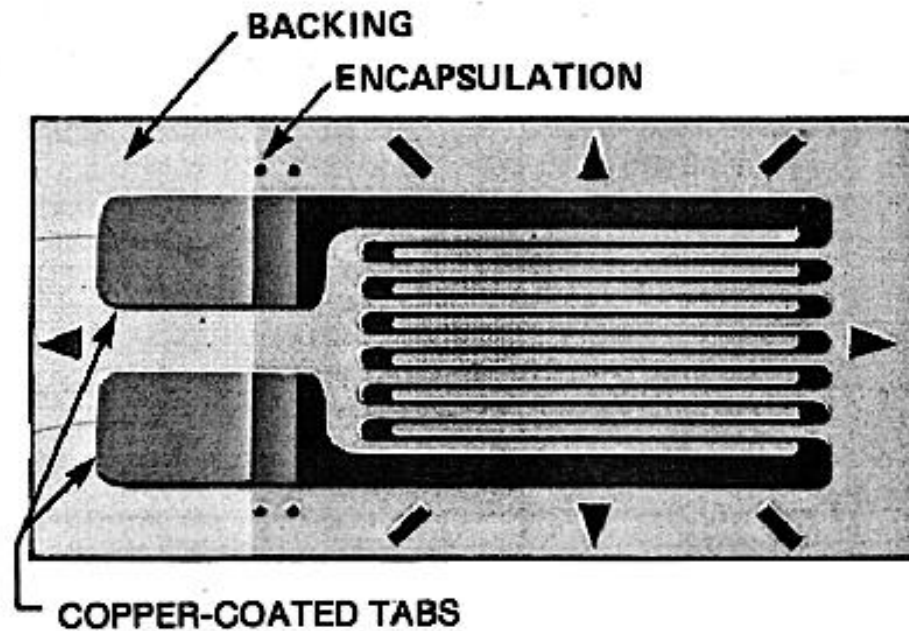


La forma del sensore serve a renderlo più sensibile in una direzione che nell'altra

Fattore di Gauge: 
$$G = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}$$

$\nu$  = rapporto di Poisson del materiale

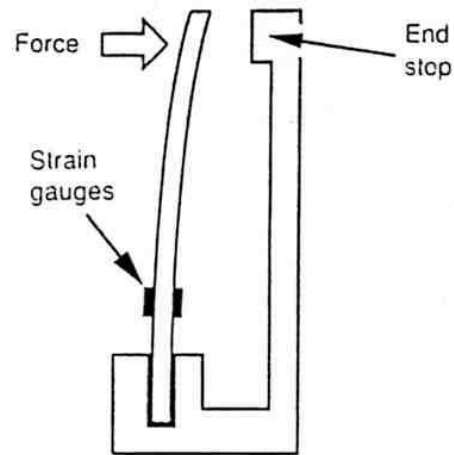
# Strain gauges



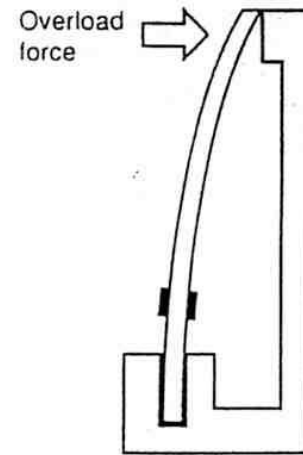
CODES FOR BASIC PATTERNS

N	Q
R	Y
T	C
U	X
Z	P

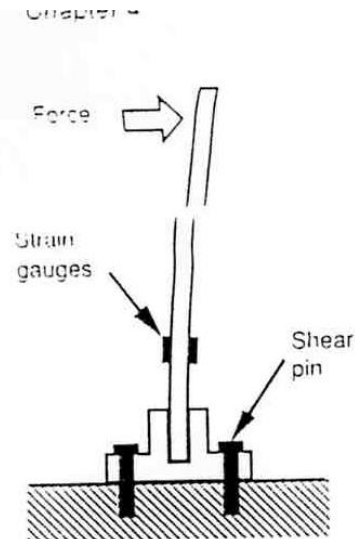
# Sensori che usano strain gauge



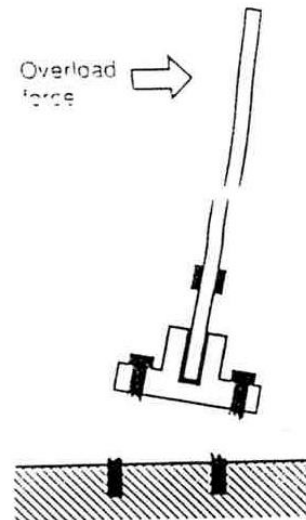
(a) Small applied force



(b) Overload force applied

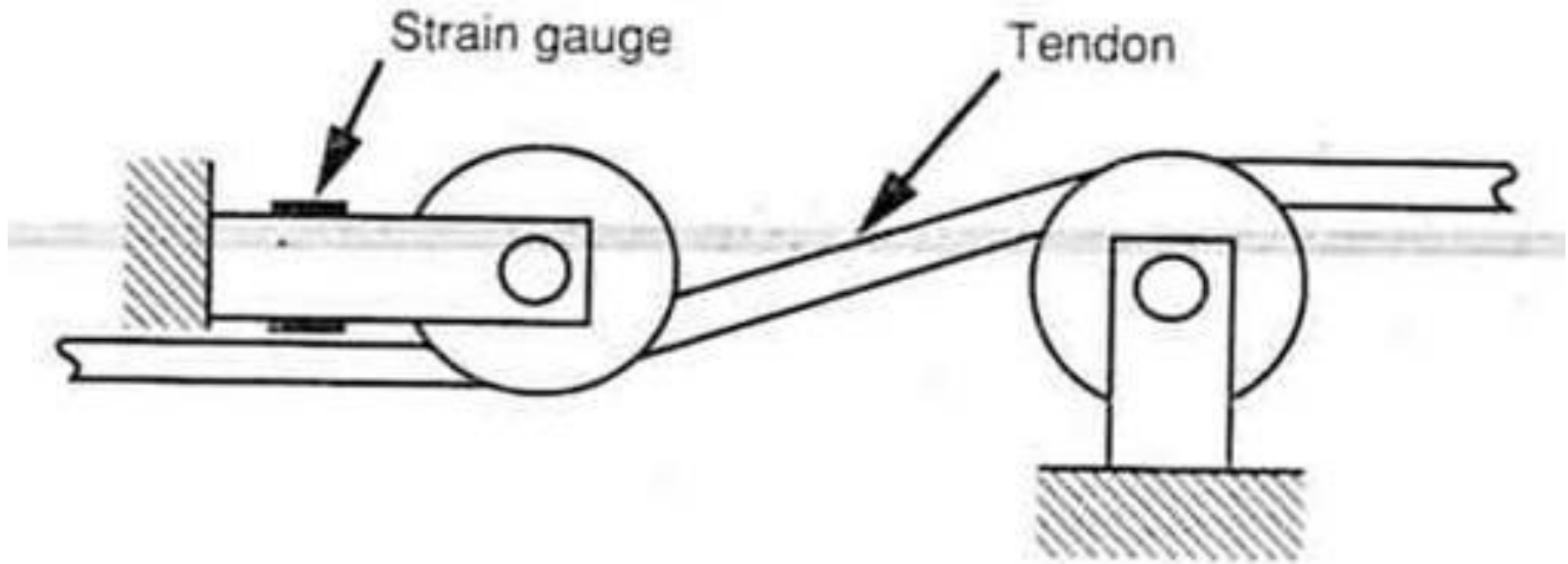


(a) Small applied force

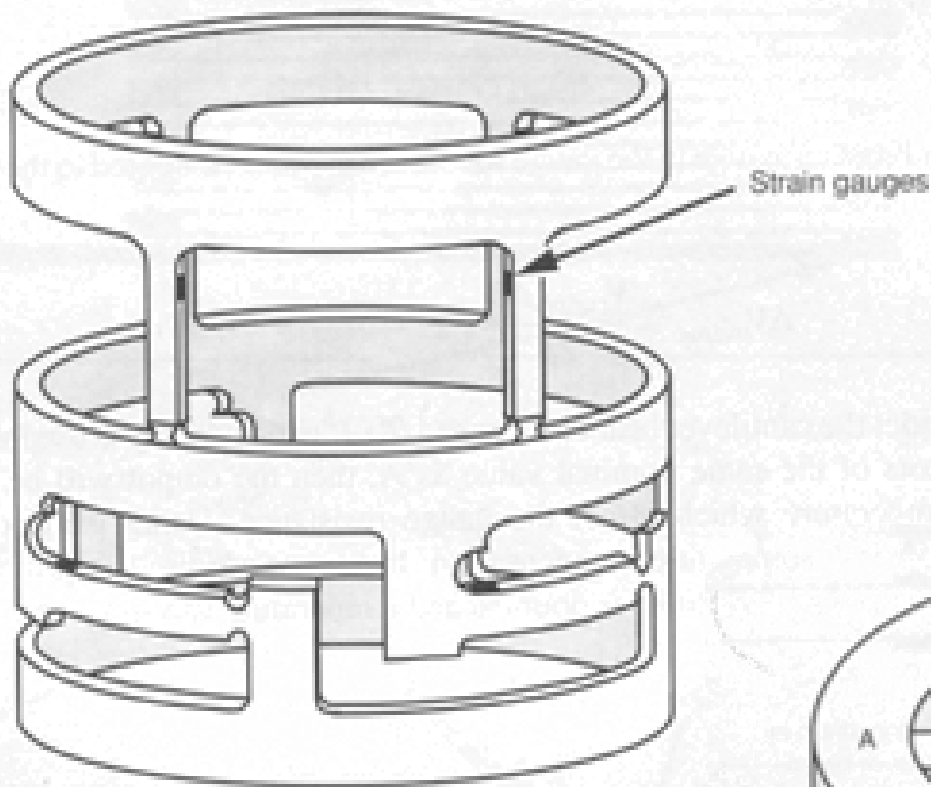


(b) Overload force applied

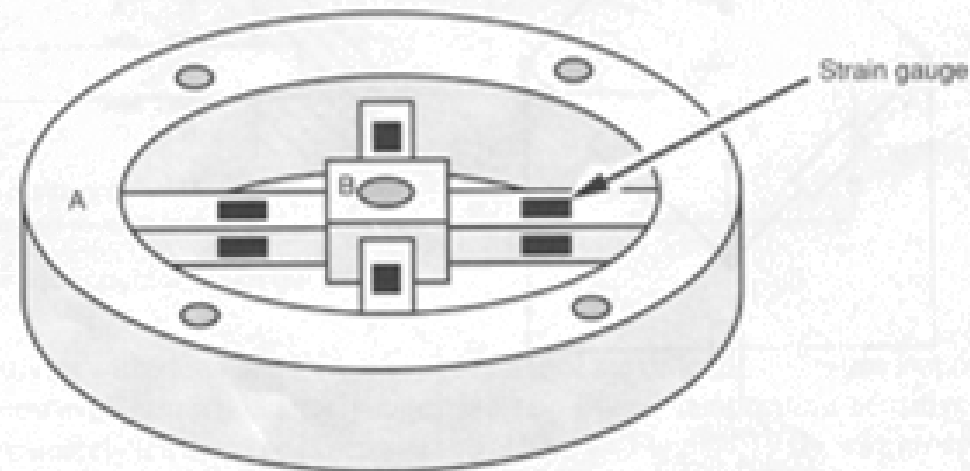
# Cable tension sensor



# Sensori di forza/coppia a 3 componenti



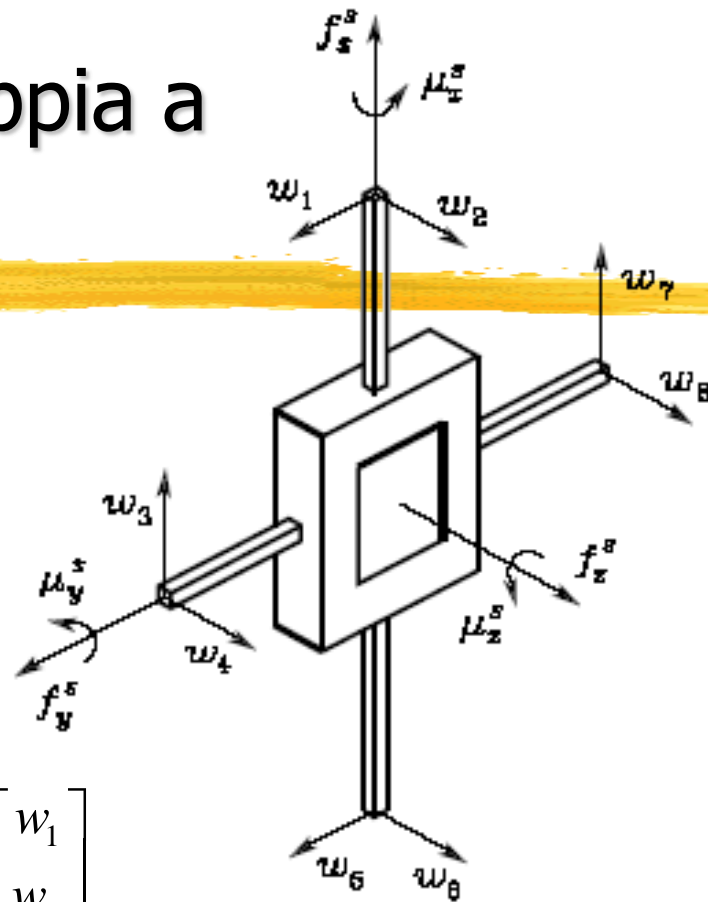
- Strutture meccaniche con direzioni di deformazione preferenziali, date da indebolimenti, su 3 assi
- Strain gauge disposti sugli indebolimenti



# Sensore triassiale di forza/coppia a croce di Malta

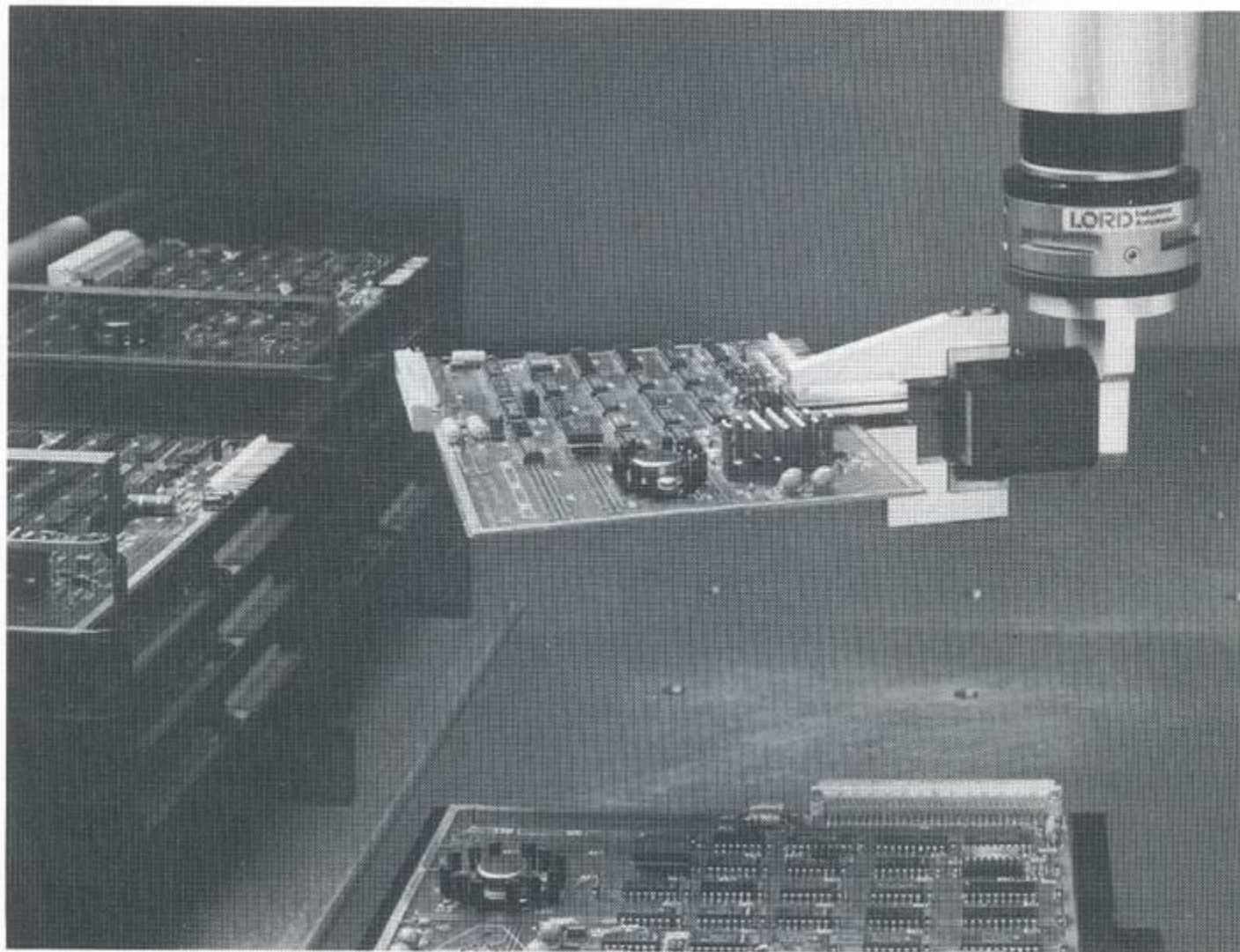
- Le forze e le coppie vengono misurate a partire dalle misure delle variazioni di resistenza degli strain gauge, moltiplicandole per una matrice di coefficienti tipica del sensore
- La matrice dei coefficienti si costruisce con una procedura di calibrazione in cui si applicano forze note

$$\begin{bmatrix} f_x^s \\ f_y^s \\ f_z^s \\ \mu_x^s \\ \mu_y^s \\ \mu_z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & 0 & 0 & c_{17} & 0 \\ c_{21} & 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 0 & c_{34} & 0 & c_{36} & 0 & c_{38} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 & 0 & c_{48} \\ 0 & c_{52} & 0 & 0 & 0 & c_{56} & 0 & 0 \\ c_{61} & 0 & c_{63} & 0 & c_{65} & 0 & c_{67} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \\ w_7 \\ w_8 \end{bmatrix}$$





# Sensori di Forza: applicazione



# Esempio di utilizzo di sensori su un prototipo di robot mobile

Sensori a effetto Hall  
sui giunti delle dita

Sensore di  
forza/coppia sul polso  
(con strain gauge)

Sensori a  
ultrasuoni

Switch sul  
paraurti



Encoder sui  
motori del  
braccio e della  
base mobile

Potenziometri  
nel sistema di  
docking



# Sommario della lezione



- Proprietà fondamentali dei sensori
- Sensori di posizione: switch, encoders, potenziometri, sensori a effetto Hall
- Misurazione della distanza: triangolazione, tempo di volo
- Sensori di distanza e di prossimità: sensori a ultrasuoni, laser, a effetto Hall e a infrarossi
- Sensori di forza: strain gauge e sensori di forza/coppia
- Sensori di accelerazione e velocità

# Quantità cinematiche

## ■ Posizione

□  $x(t); \theta(t)$

## ■ Velocità

□  $v(t); \omega(t)$

## ■ Accelerazione

□  $a(t); \alpha(t)$

## ■ Jerk

□ ...

$$\frac{d}{dt}$$

$$\int dt$$

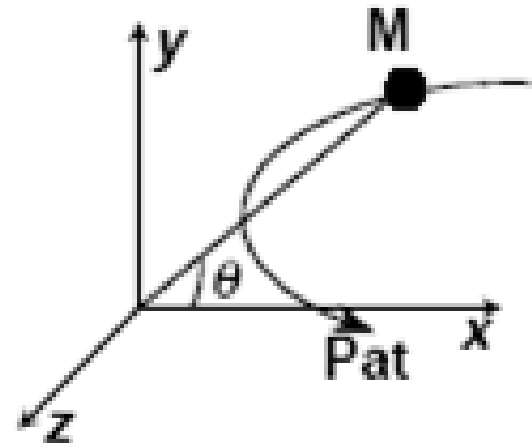
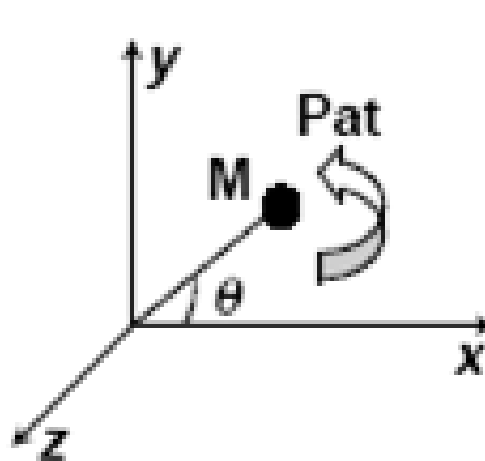
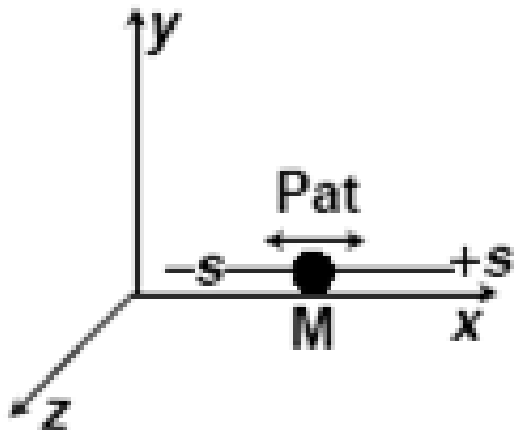
$$\frac{d}{dt}$$

$$\int dt$$

$$\frac{d}{dt}$$

$$\int dt$$

# Tipi di moto e accelerazione



■ Rettilineo:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(ds/dt)}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

■ Angolare:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d(d\theta/dt)}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

■ Curvilineo:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}\mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\mathbf{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\mathbf{k}$$

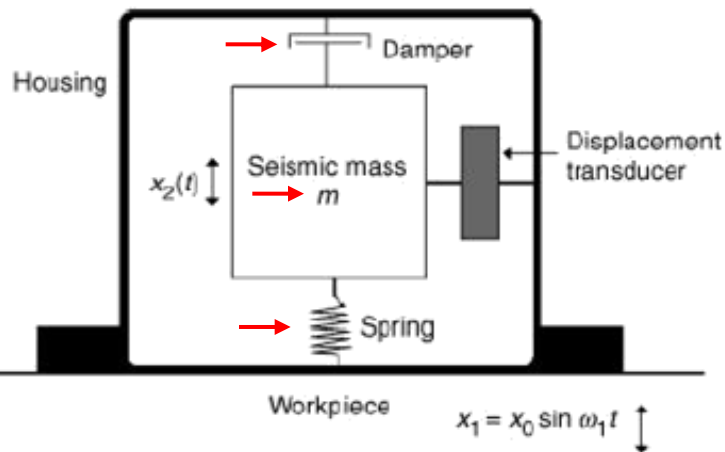


# Misura dell'accelerazione

- Metodi DIRETTI: si utilizzano **accelerometri**
  - Preferibili in caso di moti rettilinei o angolari
- Metodi INDIRETTI: si deriva la velocità
  - Preferibili in caso di moti curvilinei

# Principio di funzionamento generale tipico degli accelerometri

- La vibrazione è un fenomeno meccanico caratterizzata da un moto oscillatorio periodico attorno a una posizione di riferimento



- Un accelerometro è un dispositivo costituito da:

- Massa  $m$  (*seismic mass*)
- Elemento di supporto con caratteristiche elastiche (*springlike system*)
- Elemento smorzatore (*damper*)

- Capace di rilevare le forze esterne (compresa  $\underline{E}_{gravità}$ ) agenti sul sistema attraverso l'inerzia della massa interna sottoposta all'accelerazione e spostata proporzionalmente dalla posizione di riposo

- Un sensore traduce lo spostamento in segnale elettrico acquisibile dal sistema di misura

$$f(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + kz = mg \cos(\theta) - m \frac{d^2 x_1}{dt^2}$$

$$z = x_2 - x_1$$

$$\theta = \text{angolo rispetto alla gravità}$$

# Classificazione e Tecnologie per accelerometri

Classificazione degli accelerometri sulla base del principio di funzionamento del sensore usato per la rilevazione dello spostamento

## Principali Tecnologie

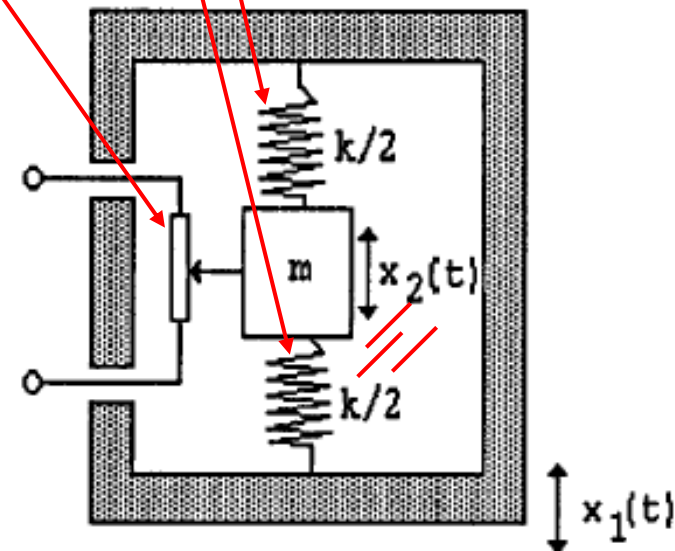
- Inerziali e meccaniche
- Piezoelettriche
- Piezoresistive: accelerometri a strain gauges
- Capacitive
- Induttive (LVDT)
- Micro- e nano-fabbricazione

# Accelerometri Meccanici

- Sistema Massa - Molla - Smorzatore + sistema meccanico per la trasduzione esterna

## Accelerometro Potenzimetrico

- La massa sismica è fissata alla struttura con due molle
  - L'elemento smorzatore (*damper*) è costituito da un liquido viscoso che interagisce con la massa in movimento
  - Il potenziometro fissato alla massa tramite uno dei terminali legge gli spostamenti come una variazione della resistenza
- Bassa frequenza di operazione ( $< 100$  Hz)
    - Soprattutto per le accelerazioni con variazioni lente e vibrazioni a bassa frequenza
  - Range dinamico tipico:  $\pm 1g$  to  $\pm 50g$  fs.
  - Frequenze naturali: 12 - 89 Hz,
  - Rapporto di smorzamento  $\zeta$ : 0.5 - 0.8
  - Resistenza del potenziometro: 1000–10000 $\Omega$ 
    - Risoluzione corrispondente: 0.45–0.25% fs.
  - Sensibilità cross-assiale:  $< \pm 1\%$ .
  - Accuratezza:  $\pm 1\%$  fs a temperatura ambiente
  - Dimensioni: 50mm<sup>3</sup> ( $< 0.1$  gr.)



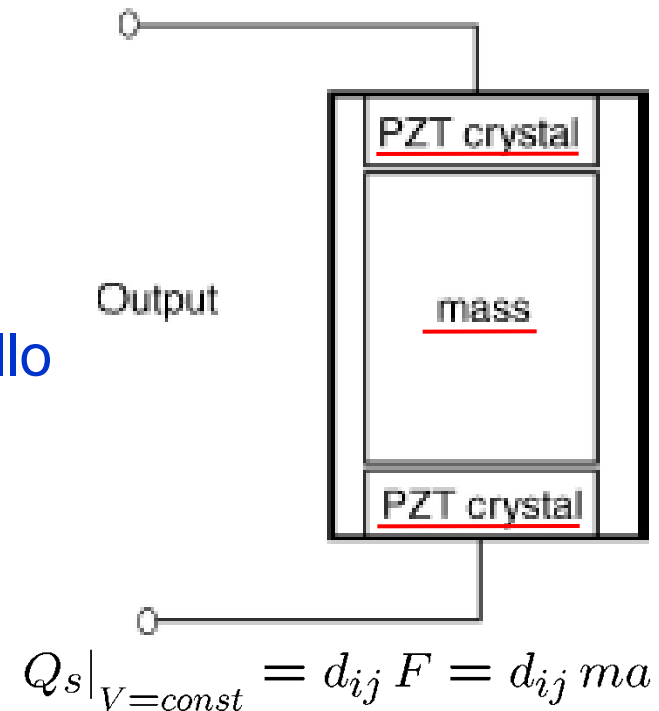
# Accelerometri Piezoelettrici

*Effetto Piezoelettrico: generazione di una differenza di potenziale con flusso di cariche ai capi di un cristallo sottoposto a stress meccanico*

## ■ Massa Sismica a contatto diretto con Cristallo Piezoelettrico

- Il cristallo, o altro elemento piezoelettrico, funziona sia da sensore che da elemento elastico di supporto alla massa
- La forza esterna causa uno spostamento della massa che agisce comprimendo il cristallo
- La compressione del cristallo induce direttamente la produzione di un segnale elettrico proporzionale

**conversione diretta di energia meccanica in energia elettrica**



$$Q_s|_{V=const} = d_{ij} F = d_{ij} ma$$

**$F$**  : forza agente sul sistema

**$d_{ij}$**  : costante piezoelettrica

**$Q_s$**  : carica generata



# Accelerometri Piezoelettrici

## ■ Caratteristiche

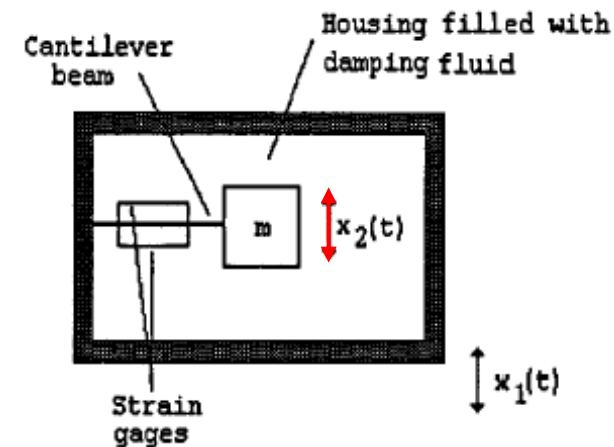
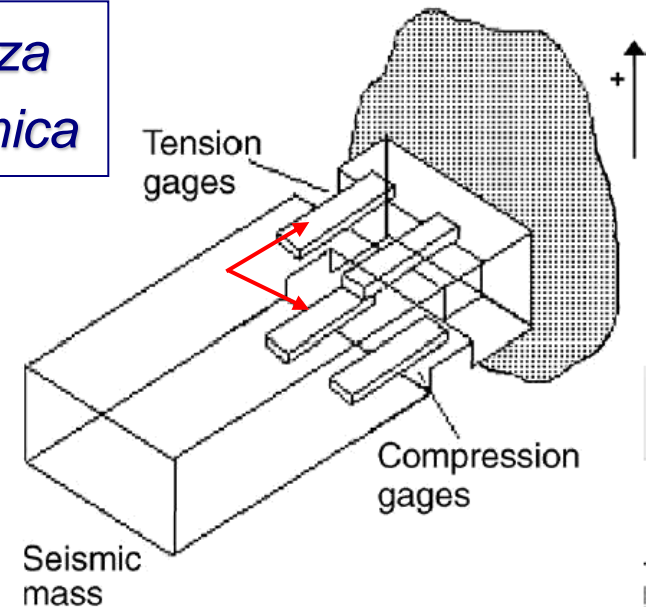
- Elevata linearità
- Utili soprattutto per applicazioni ad alte frequenze ( $f_{\text{lavoro}}$  2Hz - 5 KHz)
- Dimensioni ridotte (3 x 3 mm, ~ 0.5 g, cavi inclusi)
  - Strutture miniaturizzate integrate: anima in silicone e deposito di un sottile strato di titanato conduttivo
- Ampio range di temperature (fino a 120°)
- Resistenza a radiazioni (applicazioni in reattori nucleari)
- Buona reiezione al rumore
- Non rilevano accelerazioni continue o statiche
- Elementi sensibili: Cristalli di Quarzo o Ceramiche Conduttive (Titanato di Bario, Zirconite Titanato conduttivo - PZT, Metaniobite conduttiva)

# Accelerometri Piezoresistivi

*Effetto Piezoresistivo: variazione della resistenza elettrica in seguito ad una deformazione meccanica*

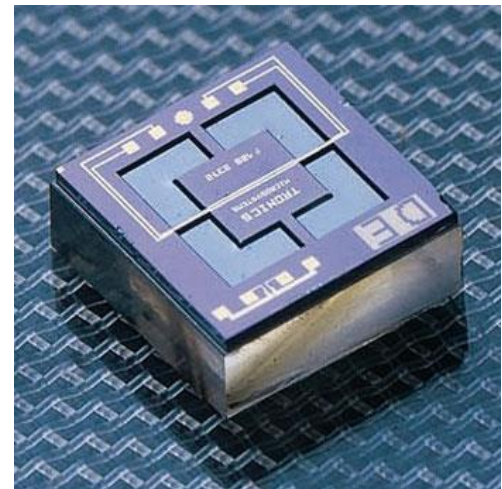
- **Massa Sismica connessa ad un sostegno elastico con Strain-Gauge e fluido viscoelastico come smorzatore**

- Gli strain-gauge sono fissati ai lati dell'elemento elastico
- Lo *strain* misurato è direttamente connesso all'ampiezza e al rate di spostamento e quindi all'accelerazione
- Il segnale di output è acquisito da un sistema connesso a un apposito circuito (ponte di wheatston)



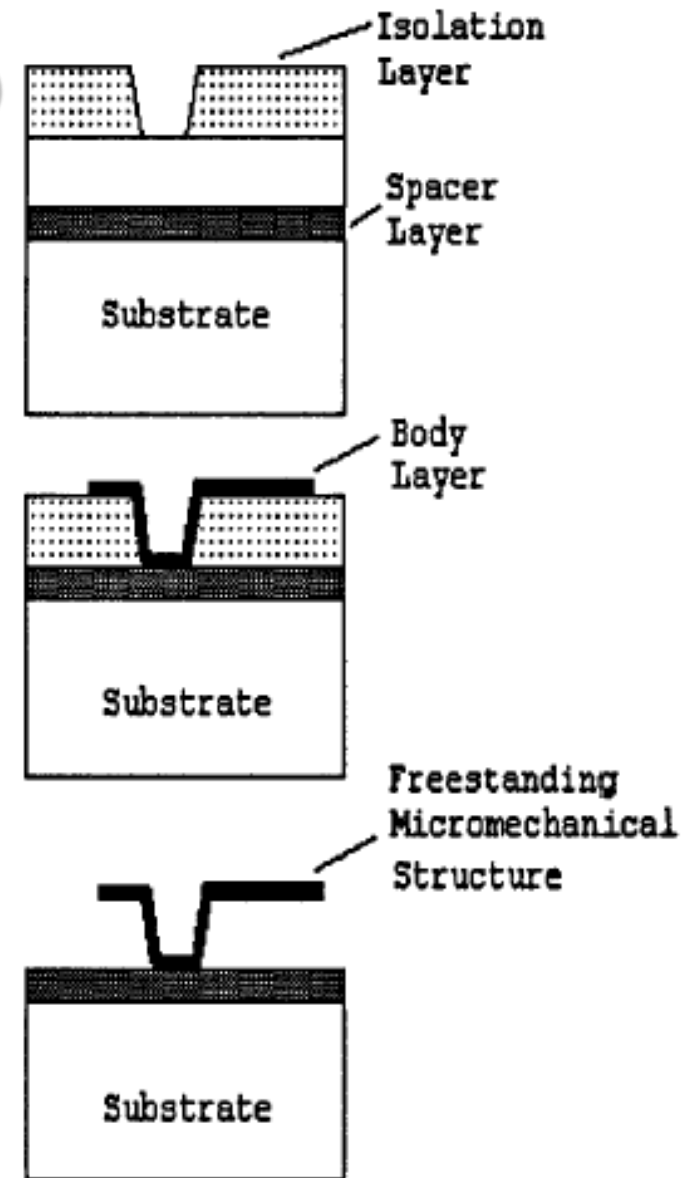
# Accelerometri Piezoresistivi

- Caratteristiche
- Si usano semiconduttori con elevato fattore di gauge
- La sensibilità del sensore è legata alla risposta elastica della struttura e alla resistività del materiale
- Utili soprattutto per applicazioni a basse frequenze ( $f$  lavoro 1 Hz - 20 KHz)
- Frequenza naturale  $\sim 300$  Hz
- Con buon design resistono fino a 10.000 g
- Utile microfabbricazione integrata per uniformare caratteristiche degli strain-gauge al sistema (resistenza a  $T^\circ$ )
- Leggeri: 1 – 10 g



# Micro-accelerometers

- Utilizzo di tecnologia di circuiti integrati (IC) per la fabbricazione di strutture elettromeccaniche 3D
- Primo accelerometro: 1979
- Si sfruttano le proprietà della struttura cristallina del silicio per ottenere stabilità e robustezza
- Etching di film depositati su wafer di silicio
- Possibilità di integrare su un singolo chip più accelerometri in modo da misurare le accelerazioni nello spazio 3D ( $\underline{a}_x$ ,  $\underline{a}_y$ ,  $\underline{a}_z$ )
- Misurazione degli spostamenti con tecnologie capacitive, piezoelettriche o piezoresistive e tecnologia CMOS

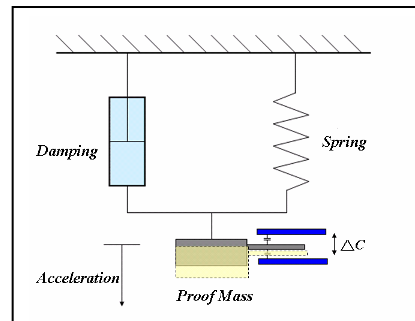
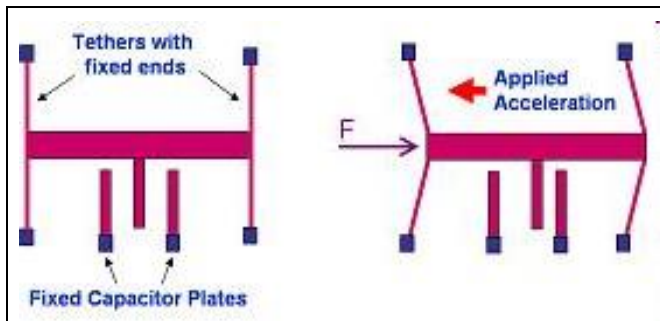


# Practical examples: *Nintendo Wii*

The Wii Remote has the ability to sense acceleration along three axes through the use of an ADXL330 accelerometer



The sensor is a polysilicon surface micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. Acceleration deflects the moving mass and unbalances the differential capacitor resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration.



# Misura della velocità

## ■ Metodi basati su un riferimento

- Misure effettuate sia sull'oggetto in movimento che su un riferimento
- Si misura la velocità media

$$v_{avg} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

## ■ Metodi inerziali

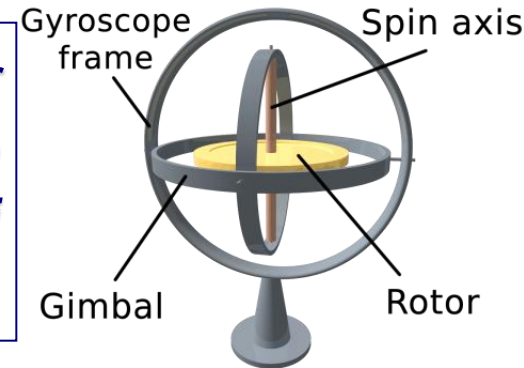
- Non richiedono il contatto con un riferimento
- Si misura la velocità relativa alla velocità iniziale del sensore

$$v(t) = v_i + \int_{t_i}^t a(\tau) d\tau$$



# Giroscopi per la misura della velocità angolare

*Il giroscopio è un dispositivo fisico rotante che, per effetto della legge di conservazione del momento angolare, tende a mantenere il suo asse di rotazione orientato in una direzione fissa*

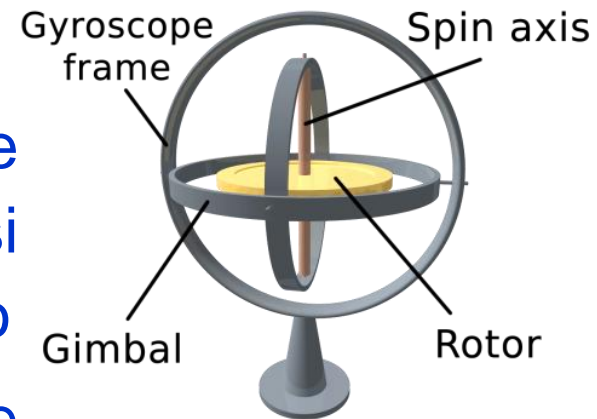


## ■ Caratteristiche fondamentali del sistema

- **Elevata inerzia e permanenza dell'asse di rotazione:** *una volta messo in rotazione, in assenza di forze esterne, tende a mantenere fissa nello spazio la direzione del suo asse di rotazione*
- **Precessione:** *movimento dovuto all'azione congiunta della forza applicata per mutare la direzione dell'asse e del momento angolare, l'asse tende a disporsi lungo la direzione perpendicolare al piano individuato dalla forza applicata e dall'asse medesimo descrivendo un cono ideale*

# Principio di funzionamento generale tipico dei giroscopi

- Un **giroscopio** è un dispositivo costituito da:
  - Rotore a forma di toroide che ruota attorno al proprio asse (*Spin axis*)
  - Sospensione cardanica (*Gimbal*) che permette al rotore di orientarsi liberamente nelle tre direzioni dello spazio
  - Se il rotore è in rotazione il suo asse tende a mantenersi orientato nella stessa direzione anche se il supporto cambia orientamento



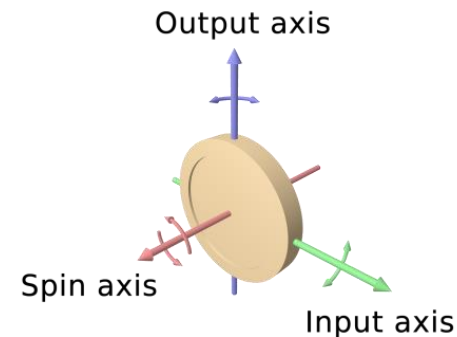
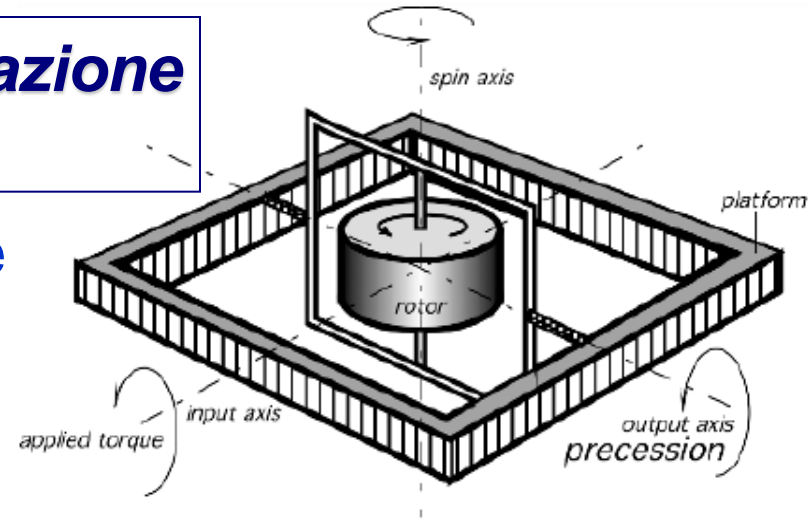
*(meccanismo inventato nel 1852 dal fisico Jean Bernard Léon Foucault nell'ambito dei suoi studi sulla rotazione terrestre)*



# Giroscopio meccanico rotante

***Basato sul principio di conservazione del momento angolare***

- Un disco (rotore) è libero di ruotare rispetto a uno/due assi di *spin* (giroscopio a 1/2 DOF)
- Se viene applicata una rotazione al supporto del giroscopio attorno all'asse di *input*, il giroscopio viene spinto a ruotare attorno a un'asse perpendicolare (di *output*)
- Il giroscopio può generare un segnale in uscita proporzionale alla velocità angolare di un'asse perpendicolare all'asse di *spin*



$$T = I\omega\Omega$$

***T : torsione applicata***

***I: inerzia***

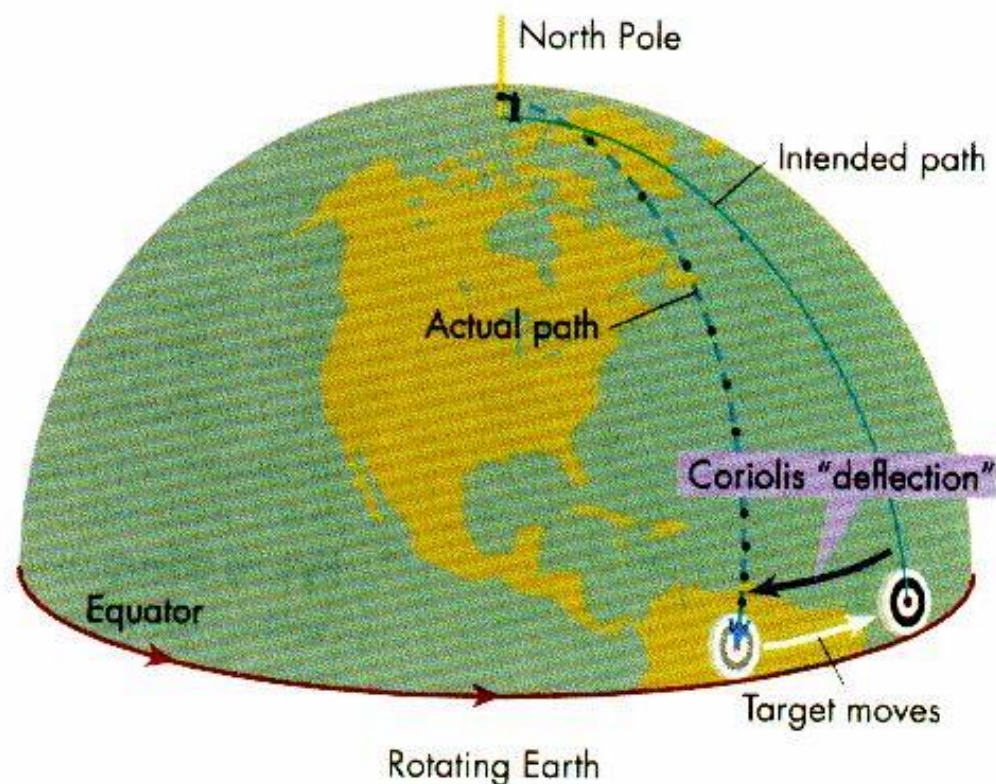
***$\omega$ : velocità rotore mantenuta costante***

***$\Omega$ : velocità angolare intorno all'asse di output***

# Effetto Coriolis

(effetto descritto nel 1835  
dall'ingegnere e matematico francese  
Gustave-Gaspard Coriolis)

*La Forza di Coriolis è una forza apparente, a cui un corpo risulta soggetto quando si osserva il suo moto da un sistema di riferimento che sia in moto circolare rispetto a un sistema di riferimento inerziale.*



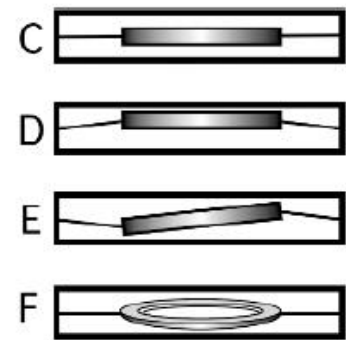
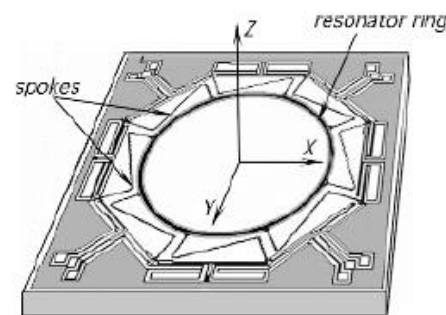
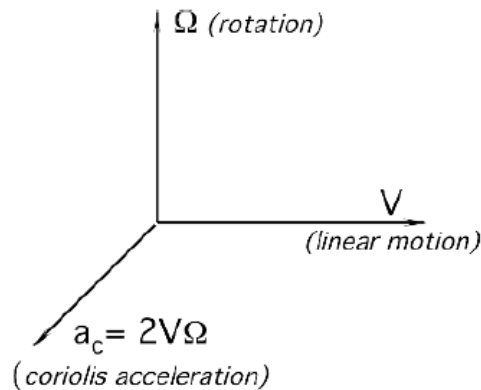
La formula matematica che esprime la **forza di Coriolis** è la seguente:

$$\vec{F}_C = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$$

$\vec{F}_C$  è la forza di Coriolis,  
 $m$  è la massa,  
 $\vec{v}$  è la velocità lineare,  
 $\vec{\omega}$  è la velocità angolare del sistema in rotazione

# Giroscopi basati sull'accelerazione di Coriolis

***MEMS con elemento vibrante (Quarzo), al posto del rotore, che viene fatto muovere linearmente di moto armonico***



- L'accelerazione di Coriolis si manifesta in un corpo quando si muove linearmente in un sistema di riferimento che ruota attorno ad un'asse perpendicolare a quella del moto lineare
- L'accelerazione risultante, direttamente proporzionale alla velocità di rotazione, si genera in direzione del terzo asse perpendicolare al piano definito dagli altri due

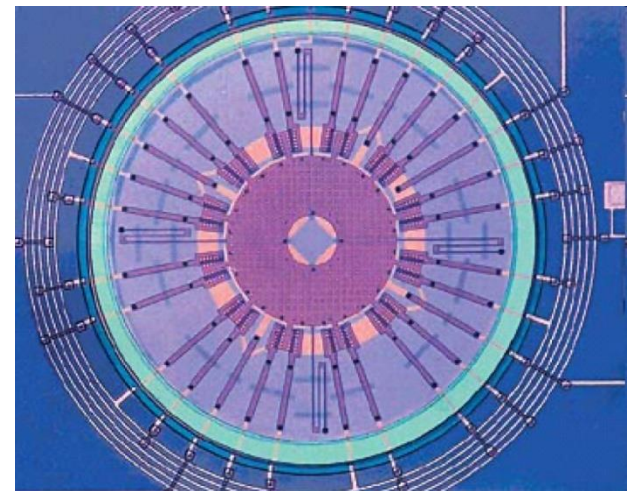
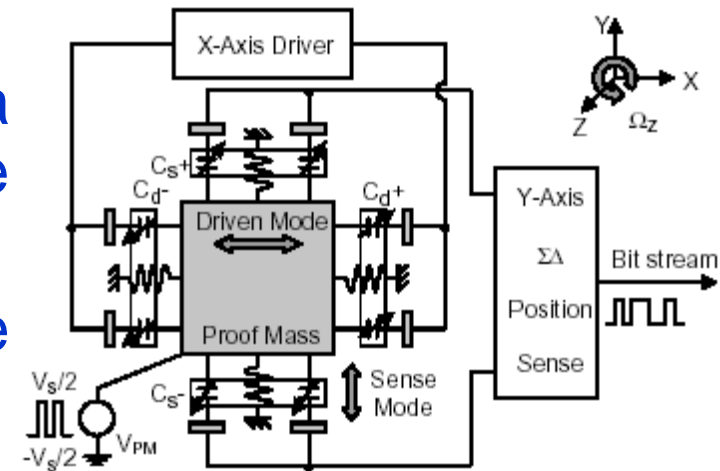
# Giroscopi basati sull'accelerazione di Coriolis

- L'elemento vibrante genera una seconda vibrazione in direzione perpendicolare alla prima
- Misurando la vibrazione indotta è possibile ottenere il grado di rotazione

## ■ Caratteristiche

- Maggiore robustezza
- Miniaturizzazione
- Produzione su larga scala e in ambienti particolari (applicazioni aerospaziali, militari, marine, ...)

*A polysilicon surface-micromachined vibrating wheel gyro, designed at the Berkeley Sensors and Actuators Centre*



# Practical examples: *xsens*

The MTi is a miniature size and low weight 3DOF Attitude and Heading Reference System (AHRS).



- **3D Gyroscopes**
- **3D Accelerometers**
- **3D Magnetometers**

The gyroscopes are used to calculate orientation. Integration drift is inevitable whilst using gyroscopes. To compensate for drift completely, the MTi corrects its orientation every sample using the gravity and the earth magnetic field as reference vectors.

**MTi**

short movie

Miniature Attitude and  
Heading Reference System